

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Model vakuového zhášedla
Model of vacuum interrupter

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Darda**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Model vakuového zhášedla**
Model of vacuum interrupter

Zásady pro vypracování:

1. Rozeberte podstatu vypínání střídavého proudu ve vakuu.
2. Popište provedení vakuových zhášedel dle principu působení.
3. Realizujte model vakuového zhášedla s radiálním magnetickým polem.
4. Proveďte výpočet silových poměrů působících na elektrický oblouk.
5. Proveďte tepelný výpočet v ustáleném stavu.
6. Rozeberte dosažené výsledky a popište možnosti využití modelů pro optimalizaci zhášedel vakuových vypínačů dle reálných zadání.

Seznam doporučené odborné literatury:


Dle pokynů vedoucího diplomové práce.

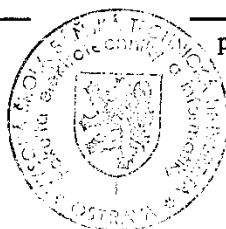
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Hytka, CSc.**

Datum zadání: 30.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení:

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Darda', with a stylized, cursive script.

V Ostravě dne: 28. 4. 2013

Michal Darda

Poděkování:

Autor diplomové práce děkuje za vedení a poskytnuté rady Ing. Zdeňku Hytkovi, CSc. a Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. za odbornou pomoc při modelování v programech Solidworks a ANSYS.

Abstrakt

Diplomová práce se věnuje komplexní problematice řešení elektromagnetického a elektrotepelného modelu vakuového zhášedla metodou konečných prvků, za pomoci výpočetního programu ANSYS. Teoretická část rozebírá podstatu vypínání střídavého proudu ve vakuu a následně popisuje konstrukční provedení vakuových zhášedel. Dále obsahuje rozbor silových a tepelných účinků elektrického proudu, které souvisí s oběma modely. Dle těchto teoretických poznatků je nejprve sestaven geometrický 3D model v kreslicím programu Solidworks a následně je importován do programu ANSYS, který umožňuje práci s fyzikálními poli. Ten byl použit pro sestavení, řešení a vyhodnocení jak elektrotepelného, tak elektromagnetického modelu. Správnost elektrotepelného modelu byla ověřena výpočtem pomocí tepelné sítě. V závěru jsou rozebrány dosažené výsledky a popsány možnosti využití modelů pro optimalizaci zhášedel vakuových vypínačů, dle reálných zadání.

Klíčová slova

vakuové zhášedlo, tepelný model, tepelná síť, simulace pohybu elektrického oblouku, radiální magnetické pole, axiální magnetické pole, numerické metody, kontakt, vakuum

Abstract

This thesis is dedicated to solving complex problems of electromagnetic and thermoelectric model of the vacuum interrupter by finite element method, using ANSYS software. The theoretical part describes the principle of switching AC current in a vacuum and then describes the design of the vacuum interrupters. It also contains an analysis of force and thermal effects of electric current, which is related to both models. According to these theoretical findings a 3D geometric model in Solidworks drawing software is built, then is imported into ANSYS software, which allows to work with physical fields. This was used to build the solution and evaluation of both thermoelectric and electromagnetic model. Accuracy of thermoelectric model was verified by calculation using the thermal network. In the conclusion are analyzed results and discussed the possibility of using models to optimize the interrupters of vacuum circuit breakers in real tasks.

Keywords

vacuum interrupter, heat model, heat net, motion simulation of electric arc, radial magnetic field, axial magnetic field, numerical methods, contact, vacuum

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Název	Jednotka
a	Vzdálenost mezi vodiči	(m)
a_T	Zrychlení	($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
B	Magnetická indukce	(T)
d	Průměr	(m)
E_Z	Emisivita povrchu	(-)
f	Frekvence	(Hz)
F	Síla obecně	(N)
F_C	Celková síla	(N)
F_N	Odstředivá síla	(N)
F_T	Tečná síla	(N)
F_X	Síla ve směru osy x	(N)
F_Y	Síla ve směru osy y	(N)
F_Z	Síla ve směru osy z	(N)
H	Intenzita magnetického pole	($\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$)
i	Okamžitá hodnota elektrického proudu	(A)
I	Elektrický proud (efektivní hodnota)	(A)
I_{DC}	Stejnoseměrný elektrický proud	(A)
I_K	Zkratový proud	(kA)
I_{KN}	Jmenovitý zkratový proud	(kA)
I_M	Maximální hodnota elektrického proudu	(A)
I_N	Jmenovitý elektrický proud	(A)
J	Proudová hustota	($\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$)
k	Součinitel (konstanta)	(-)
l	Délka	(m)
m	Hmotnost	(kg)
n	Počet	(-)
O	Obvod	(m)
P	Tlak	(Pa)
q	Tepelné ztráty v objemu	($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$)
Q	Tepelný tok	(W)
r	Poloměr	(m)
R	Elektrický odpor	(Ω)
R_{CH}	Tepelný odpor chladicí tyče	($\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)
R_S	Stykový elektrický odpor	(Ω)
R_{ST}	Stykový tepelný odpor	($\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)
R_T	Tepelný odpor	($\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)
R_{TL}	Tepelný odpor - podélný	($\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)
R_{TT}	Tepelný odpor - příčný	($\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)
s	Dráha	(m)
S	Plocha	(m^2)
t	Čas	(s)

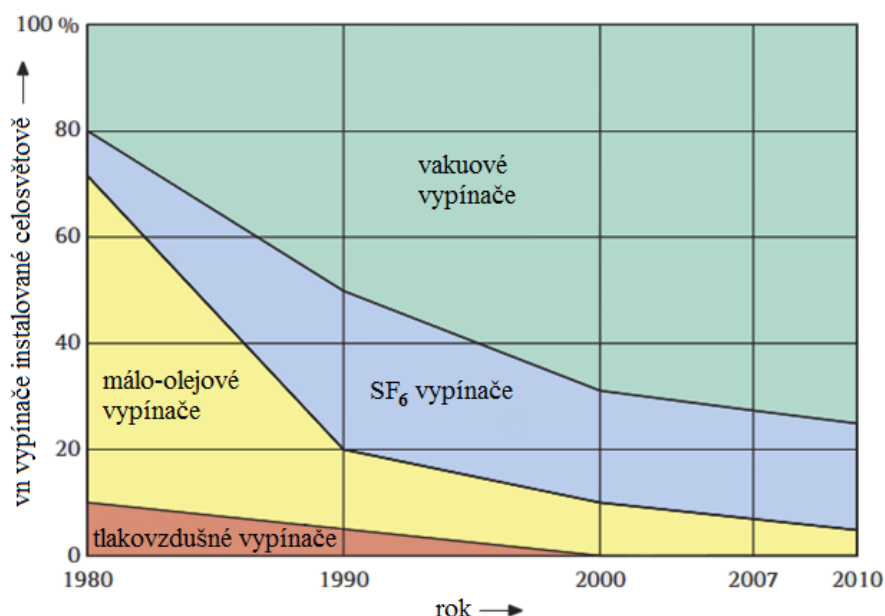
T	Teplota	(°C)
T_R	Teplota referenční	(°C)
U	Elektrické napětí	(V)
U_N	Jmenovité napětí	(V)
U_P	Průrazné napětí	(kV)
v	Rychlost	(m·s ⁻¹)
x, y, z	Vzdálenost ve směru souřadného systému	(m)
α	Úhel	(°)
α_0	Měrná chladivost (součinitel přestupu tepla do okolí)	(W·m ²)
α_K	Měrná chladivost konvekci	(W·m ²)
α_{TS}	Teplotní součinitel elektrického odporu 1	(K ⁻¹)
α_Z	Měrná chladivost zářením	(W·m ²)
β	Úhel	(°)
β_T	Substituční součinitel pro tepelný výpočet	(-)
β_{TS}	Teplotní součinitel elektrického odporu 2	(K ⁻¹)
γ_{TS}	Teplotní součinitel elektrického odporu 3	(K ⁻¹)
δ_T	Substituční součinitel pro tepelný výpočet	(-)
ϑ	Oteplení	(°C)
ϑ_P	Oteplení povrchu	(°C)
ϑ_∞	Ustálené oteplení	(°C)
λ	Tepelná vodivost	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
μ_0	Permeabilita vakua	(H·m ⁻¹)
μ_R	Relativní permeabilita	(-)
π	Ludolfovo číslo	(-)
ϱ	Měrný elektrický odpor	(Ω·m)
ϱ_R	Měrný elektrický odpor	(Ω·m)
φ	Úhel mezi vektory odstředivé a celkové síly působící na oblouk	(°)
ψ	Úhel posuvu oblouku v cylindrickém souřadném systému	(°)
ω	Úhlová rychlost	(s ⁻¹)
3D	Trojrozměrný	
AMF	Axiální magnetické pole	
RMF	Radiální magnetické pole	
vn	Vysoké napětí	
vvn	Velmi vysoké napětí	

Obsah

1.	Úvod.....	9
2.	Podstata vypínání elektrického proudu ve vakuu.....	11
3.	Provedení vakuových zhášedel dle principu působení.....	17
3. 1.	Zhášedla využívající radiální magnetické pole	19
3. 2.	Zhášedla využívající axiální magnetické pole	21
4.	Silové a tepelné účinky elektrického proudu	24
4. 1.	Silové účinky elektrického proudu	24
4. 2.	Tepelné účinky elektrického proudu.....	28
5.	Realizace modelu zhášedla s radiálním magnetickým polem	34
5. 1.	Materiály	34
5. 2.	Geometrický model zhášedla (Solidworks)	36
6.	Elektromagnetický model vakuového zhášedla s RMF	38
6. 1.	Sestavení numerického modelu (ANSYS - Workbench)	38
6. 2.	Řešení modelu	41
6. 3.	Vyhodnocení modelu.....	43
7.	Elektrotepelný model vakuového zhášedla s RMF v ustáleném stavu.....	47
7. 1.	Sestavení numerického modelu (ANSYS – Workbench)	47
7. 2.	Vyhodnocení tepelného modelu	50
7. 3.	Kontrolní výpočet oteplení pomocí tepelné sítě.....	52
8.	Závěr	54
9.	Použitá literatura	56
10.	Seznam příloh.....	57

1. Úvod

Vývoj vakuových spínacích přístrojů byl v posledních čtyřiceti letech největší v historii technologie výkonového vypínání. Problém výroby spočívá v nejdůležitější části a to vakuovém zhášedle, kterému je tato práce věnována. Vakuové vypínače existovaly už v roce 1950, ale měly velmi omezené schopnosti s vypínáním a přenášením proudu. V té době nebylo možné získat čisté odplyněné kontaktní materiály, byly potíže s čerpáním a nebylo možné realizovat vakuovou těsnost spojováním kovů a izolantů. V současnosti vakuové spínací přístroje dominují v celé oblasti vysokého napětí a jejich rozvoji je na celém světě věnována značná pozornost. Oblouk hořící ve vakuu je odlišný od oblouku hořícího v plynu. Proto je nutné pochopit odlišnosti vakua, pokud máme navrhnout a zkonstruovat vakuové zhášedlo úspěšně.



Obr. 1.1 Rozmach vakuové spínací techniky

Vakuová zhášedla využívají ke zhášení oblouku velké rychlosti difúze částic ve vakuu. Plazma vypínacího oblouku se následkem rychlých difúzních pochodů ve vakuu roztáhne do velkého průměru a vyplní téměř celý prostor vakuové nádoby, v níž jsou umístěny elektrody vypínače. Koncentrace nabitých částic je tak malá, že oblouk uhasne v první nule proudu. Vakuové vypínače mají nejmenší kontaktní zdvih ze všech druhů vypínačů, nehodí se proto pro vypínání stejnosměrného proudu a nedají se zařadit ani do skupiny vypínačů s vlastní energií, ani do skupiny vypínačů s cizí energií.

Diplomová práce je věnována těmto vakuovým zhášedlům a jejich modelům. V kapitole č. 2, která následuje po úvodu je teoreticky rozebrána podstata vypínání střídavého proudu. Zde je vysvětlen elektrický oblouk hořící ve vakuu, jeho vlastnosti, podoby a vlastní zhášení. V následující kapitole jsou vysvětleny specifické vlastnosti vakuových zhášedel, jejich konstrukce a základní rozdělení podle typu zhášení na zhášedla s radiálním a axiálním magnetickým polem. Kapitola č. 4 je teoretickým rozбором silových a tepelných účinků elektrického proudu, které slouží k seznámení čtenáře s touto problematikou pro pochopení elektromagnetického a elektrotepelného modelu. Je zde vysvětleno silové působení mezi dvěma vodiči a na pravoúhlý záhyb, který je základem pro vznik radiálního magnetického pole. V další části jsou vysvětleny prvky použité pro sestavení tepelné sítě, tepelný součinitel odporu materiálu a souhrnná chladivost povrchu, která je nejdůležitějším parametrem pro správné sestavení elektrotepelného modelu. [2,6]

Následující kapitola č. 5 se zabývá realizací zhášedla s RMF pro oba modely. Jsou zde uvedeny zadané výchozí parametry zhášedla, použité materiály, návrh kontaktního systému a výběr pouzdra. Přiloženy jsou obrázky geometrického modelu vytvořeného v kreslicím programu Solidworks. Kapitoly č. 6 a 7 obsahují praktické řešení elektromagnetického a elektrotepelného modelu vakuového zhášedla. To bylo provedeno v laboratoři modelování fyzikálních polí, vybavenou špičkovým programem ANSYS pracujícím na principu metody konečných prvků. Stěžejní výhodou ANSYSu je jeho schopnost tato fyzikální pole mezi sebou vzájemně kombinovat a jednotlivé úlohy tak řešit s maximální možnou komplexností. Závěrem jsou rozebrány dosažené výsledky a popsány možnosti využití modelu pro optimalizaci zhášedel vakuových vypínačů, dle reálných zadání.

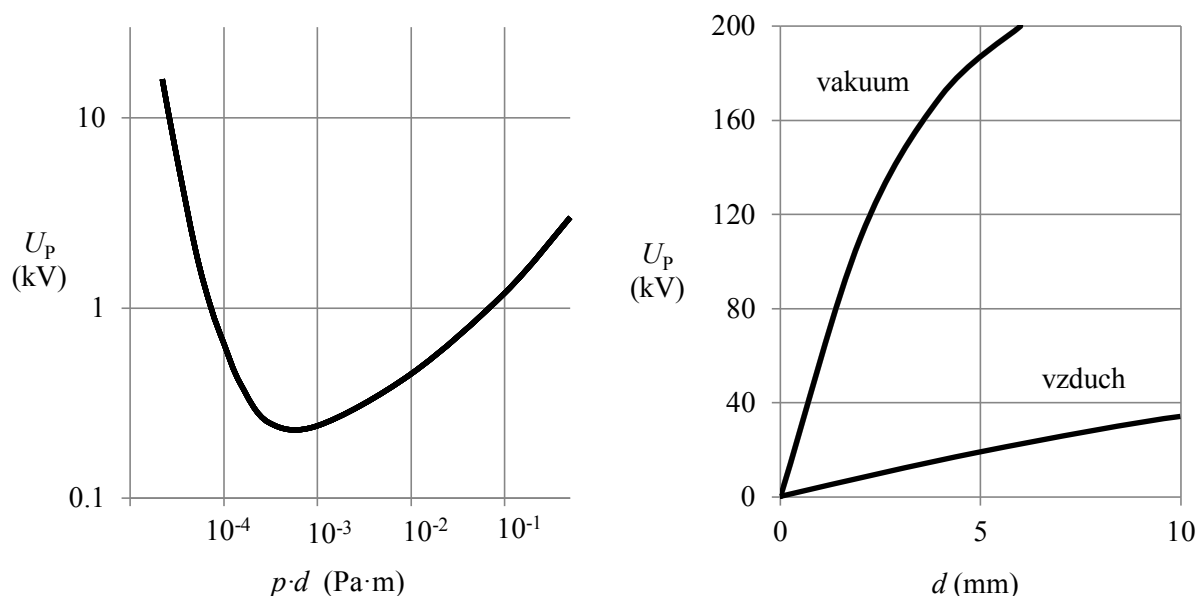


Obr. 1.2 Různé provedení vakuových zhášedel (Siemens)

2. Podstata vypínání elektrického proudu ve vakuu

Na rozdíl od vypínačů s klasickými zhašecími médii, je třeba řešit u vakuových vypínačů specifické problémy spojené s pochody, vznikajícími při hoření oblouku ve vakuu. Těžší problematiky vakuového vypínání spočívá převážně v konstrukci mechanicky pevné a vakuově těsné nádoby, dále ve volbě a technologickém zpracování kontaktních materiálů. Jako první materiál na kontakty byla použita čistá měď. Odplynění mědi je však obtížné a často pak docházelo v důsledku nedokonalého odvodu tepla z povrchu kontaktů do okolí (které se může dít jen zářením) k měknutí, deformaci a svaření mědi i bez spolupůsobení oblouku. Tyto zkušenosti s mědí vedly k aplikaci jiných, tepelně odolnějších kovů jako je molybden či wolfram, které se také snáze odplyňují než měď. Objevily se však jiné nesnáze. Zatímco kupř. wolframem lze dobře řešit otázku svařování, vede jejich aplikace k usekávání proudu již při hodnotách kolem 100 A. Důsledkem je vysoké přepětí a v indukčních obvodech opakované průrazy, neboť studená charakteristika vakuového vypínače narůstá strmě do značných hodnot. Až s příchodem nových výrobních technologií bylo možno použít slitutých materiálů (CuBi, WCu, WCuAg, MoCu a hlavně CuCr), které spojují dobré elektrické vlastnosti s vynikající schopností vypínat obvod a dobrou odolností proti svaření.

Také tvar elektrod byl výrazně zdokonalen. Od dříve jednoduché válcové konstrukce s čelním stykem se přešlo na spirálové a miskové konstrukce, které velmi zvyšují pohyb oblouku po povrchu kontaktů a axiální magnetická pole podporují tvoření difúzních oblouků i při velmi vysokých proudech.

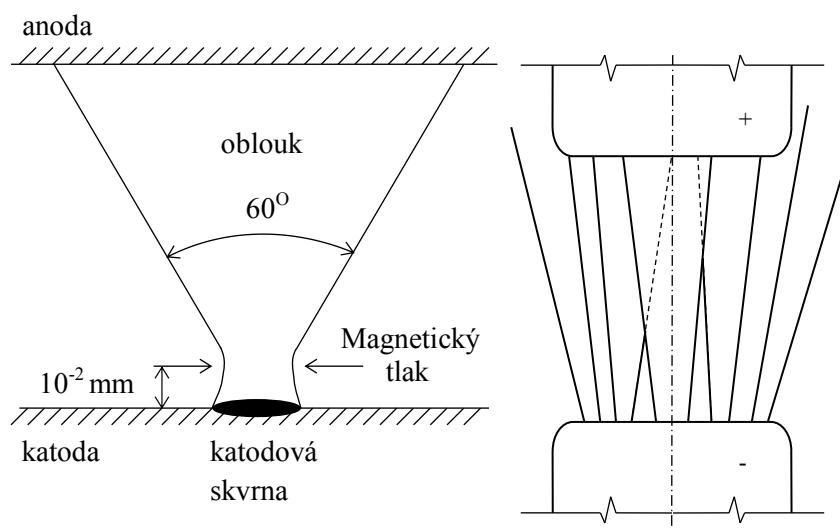


Obr. 2.1 Křivka Paschenova zákona a elektrická pevnost prostředí

Vakuová zhašedla jsou k dispozici v celém rozsahu středního napětí od 3,2 kV do 38 kV a mohou spolehlivě vypínat nejvyšší hodnoty zkratového proudu v každé napěťové hladině. Mezi jejich výhody oproti jiným konstrukcím, patří zejména možnost použití v extrémních provozech (jsou nehořlavé, nevýbušné, nepůsobí nepříznivě na okolní prostředí ani jím nejsou ovlivňovány). Další výhody: mohou pracovat v libovolné poloze, malý zdvih kontaktů umožňuje použití jednoduchého pohonného mechanismu, po dobu své životnosti (přes 10000 pracovních cyklů) se nemusí kontrolovat a jsou snadno recyklovatelná. [1,2]

Pochody na oddalujících se kontaktech jsou příčinou vzniku oblouku hořícího v kovových parách emitovaných z katodové skvrny s vysokou teplotou. Na materiálu kontaktů závisí velikost mezního proudu přenášeného katodovou skvrnou.

Tento proud se pohybuje v rozmezí 100 až 200 A. Se zvyšujícím se proudem se počet katodových skvrn zvětšuje. Z katodových skvrn difundují páry směrem ke chladnější anodě a okolním chladným stěnám, na kterých kondenzují. Při zmenšování proudu směrem k nule ubývá počet katodových skvrn, zmenšuje se množství par, snižuje se počet nosičů náboje, oblouk se stává nestabilním a uhasíná. Oblouk je charakterizován malým napětím oblouku, má difúzní charakter a nazýváme ho vakuovým obloukem. Vakuový oblouk je znázorněn na obr. 2.2. Má tvar kuželu s vrcholem na katodě. Styková plocha oblouku s anodou je velká, což zaručuje, že na anodě se neobjeví přehřáté místo. Při hoření oblouku unikají z jeho trupu do okolního prostoru jednotlivé ionizované částice. Tyto částice je nutné doplňovat, a proto se musí oblouk stále zásobovat kovovými parami z katodové skvrny. Při nedostatečném přísunu kovových par oblouk ztrácí stabilitu a vypínač odsekává proudy mimo jejich přirozenou nulu.



Obr. 2.2 Oblouk ve vakuu

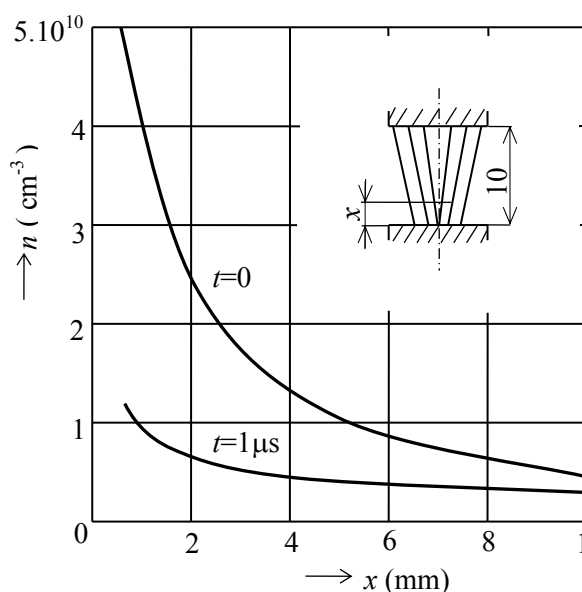
Tento oblouk je limitován velikostí proudu. Při zvětšení proudu nad asi 10 kA (v závislosti na materiálu kontaktů) má plazma oblouku snahu přemísťovat se k anodě, čímž se zvyšuje teplota anody a vytváří se anodová skvrna. Oblouk difúzní tak přechází na oblouk vysokotlaký. Proud ve své nule nezaniká, po komutaci proudu se anoda stává katodou a jsou na ni vytvořeny podmínky pro další hoření oblouku. Zhášení vysokotlakého oblouku je oproti oblouku difúznímu obtížnější. Zabránění vzniku anodové skvrny je tedy jedním ze základních úkolů při konstrukci zhášecí soustavy vakuového vypínače. Prakticky je tomu možno zabránit vytvořením magnetického pole, působícího na oblouk tak, aby k vytvoření anodové skvrny nedošlo. K tomuto účelu slouží zvláštní konstrukce kontaktů vytvářející, dle směru působení na kontakt, pole radiální nebo pole axiální. Účinkem radiálního pole se katodové skvrny difúzního oblouku pohybují uspořádaně, popř. se pohybuje anodová i katodová skvrna oblouku v koncentrované formě. Tímto způsobem se elektrodové skvrny dostávají do míst, v nichž jsou horší podmínky pro jejich existenci (chladné elektrody). Účinek axiálního pole zcela konkrétní magnetické indukce (cca 0,08 až 0,14 T pro proudy 20 – 40 kA) je poněkud odlišný, neboť jeho působením si oblouk zachovává difúzní charakter i tehdy, jestliže se katodové skvrny nepohybují. Oblouk nabývá charakteru staženého útvaru složeného z paralelních difúzních oblouků stabilizovaných při minimálním obloukovém napětí (přibližně 42 až 52 V). Takto hořící dělený oblouk dodává do prostoru mezi kontakty minimální energii, která nedostačuje k vytvoření anodové skvrny.

[1,2]

Zánik oblouku je spojen se snížením hustoty par v prostoru mezi kontakty a s rekombinací částic, což je souhrn pochodů, při nichž ionizované částice zanikají. Snížení hustoty par je závislé na časové konstantě ochlazování katodových skvrn, která je v případě difúzního oblouku menší než $1 \mu\text{s}$. V rekombinačních pochodech sehrává nejvýraznější roli difúze částic a její zvláštní forma – ambipolární difúze, která vzniká vlivem rozdílné difúzní konstanty elektronů a kladných iontů. Elektrony, mající větší difúzní konstantu než kladné ionty, pronikají do prostoru rychleji. Tím dochází k porušení kvazineutality plazmatu a vzniklý prostorový náboj vytváří elektrické pole, které urychluje difúzi kladných iontů a brzdí difúzi elektronů. V ustáleném stavu se difúzní rychlosti částic vyrovnají a prostorové náboje vytvoří jen odpovídající elektrické pole. Účinek zmíněných jevů na deionizaci prostoru mezi kontakty je znázorněn na obr. 2.3. Rychlá deionizace prostoru mezi kontakty dává předpoklad úspěšného zvládnutí extrémních podmínek vypínání. Experimentálně bylo ověřeno úspěšné vypnutí při strmých poklesech proudu $di/dt = 500 \text{ A}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ a nárůstu zotaveného napětí $18 \text{ kV}\cdot\mu\text{s}^{-1}$. Rekombinační pochody souhrnně probíhají ve směru příčném k ose oblouku, a proto se nazývají radiální výměna částic. Je to přirozený a účinný způsob deionizace výbojové dráhy.

Při průchodu střídavého proudu nulou zanikají katodové skvrny za dobu asi 10^{-8} s . Atomy par kovů opouštějí prostor mezi kontakty rychlostí 10^3 až $10^4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Plná elektrická pevnost prostoru mezi kontakty se obnovuje v mikrosekundách. Rychlé opuštění prostoru – expanze par do okolí – způsobí značné urychlení deionizace. Část kovových par kondenzuje na anodě, část, která uniká z prostoru mezi kontakty, kondenzuje na stínících krytech obklopujících kontakty. Vypínacími pochody dochází tedy ke ztrátě kontaktního materiálu. Tato ztráta je závislá na velikosti vypínacího proudu, fyzikálních vlastnostech kontaktů, na tvaru a velikosti kontaktů. Ztráty u běžně používaných materiálů se pohybují zhruba okolo $10^{-3} \mu\text{g}\cdot\text{C}^{-1}$. Často bývají tyto ztráty z hlediska životnosti pro vakuová zhášedla limitující.

Protože ke vzniku vakuového oblouku a k jeho hoření je nutná katodová skvrna a po průchodu proudu nulou a změně polarity elektrod není na katodě (dříve anodě) žádné přehřáté místo schopné generovat kovové páry, nemůže se oblouk znovu zapálit. Vakuový vypínač tedy vypíná v první nule proudu a je vhodný k vypínání střídavých proudů, nikoli stejnosměrných.



Obr. 2.3 Obsah kovových par materiálu elektrod v oblouku (v nule proudu a $1 \mu\text{s}$ po nule proudu)

[1]

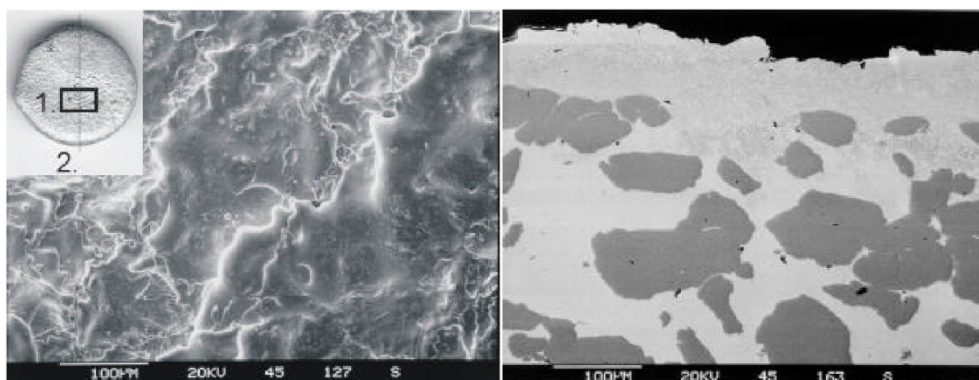
Utržení proudu před jeho přirozenou nulou je nejzávažnější problém vakuových zhášedel. Je to způsobeno tím, že při určitém minimálním proudu se neodpaří dostatek kovu katody a oblouk přestane být stabilní. Proud rychle zanikne na nulu. Toto proběhne v řádech 10^{-8} s a způsobí velké přepětí. Utržení proudu můžeme zmenšit vhodnou volbou materiálu katody nebo změnou tvaru katody.

Do základního kontaktního materiálu se přimísí materiál s vyšší tenzí par, který zajistí dostatečné množství kovových par i při nižší teplotě katodové skvrny, nebo vhodným tvarem katody zmenšíme množství odváděného tepla z katodové skvrny do tělesa katody.

Při činnosti kontaktů dochází k mechanickému a elektrickému namáhání obou dílců a tím k trvalým deformacím a úbytku hmoty přenosem materiálu. Jako přenos materiálu označujeme každý úbytek hmoty bez ohledu na to, zda se jeho část znovu ukládá na původní či protější kontakt, či zda se všechen rozptýlí do okolí. Rozeznáváme tři základní druhy opotřebení: mechanické opotřebení, můstkový přenos materiálu a obloukový přenos materiálu. Jako mechanické opotřebení označujeme deformace a případnou ztrátu materiálu při spínání naprázdno, tj. bez průtoku proudu. U spínacích kontaktů jsou ztráty materiálu mechanickým opotřebením zpravidla zanedbatelné ve srovnání s opotřebením elektrickým.

Můstkový přenos materiálu (dříve nazývaný jemným přenosem) je charakterizován tvořením hrotů na jednom kontaktu a kráterů na kontaktu druhém. Je to důsledek vytažení úžinového můstku nataveného kovu při oddalování kontaktů, ve kterém se jeho nejteplejší místo posouvá ze středu k teplejší elektrodě. Zpravidla teplejší elektrodou bývá anoda, takže výsledkem roztržení můstku v nejteplejším místě je hrot na katodě a kráter na anodě. Množství přeneseného materiálu při jednom vypnutí je sice nepatrné, ale po mnoha tisících spínacích cyklech je popsána deformace jasně patrná. Můstkový přenos materiálu je jev typický pro stejnosměrné obvody pod-obloukových parametrů.

Obloukový přenos materiálu (někdy označovaný jako hrubý přenos) je naopak typický pro kontakty v silnoproudých obvodech jako důsledek jejich tepelného namáhání vypínacím obloukem. Oblouk vlivem své vysoké teploty napadá veškerý materiál ve svém okolí a zanechává na něm trvalé deformační stopy (Obr. 2.4). Těmto účinkům nelze zabránit, proto často uvádíme oblouk do pohybu. Tím se tepelné rozrušování materiálu nekoncentruje na stejné místo a vedením tepla ve hmotě může docházet k rychlému ochlazování ohřátého povrchu.



Obr. 2.4 Snímky z elektronového mikroskopu CuCr kontaktů po několika desítkách operací (povrch kontaktu a řez kontaktem)

Nejdéle zůstávají ve styku s pevnou hmotou paty oblouku a to právě na kontaktech. I když se snažíme také zde zkrátit dobu působení oblouku na minimum, pod určitou hranici jít nelze. Protože opotřebení kontaktů obloukem má vliv na jejich životnost, musíme pro správnou volbu kontaktního materiálu znát jeho odolnost proti účinkům oblouku

Pokud se při vypínání vytvoří oblouk, dochází k vypaření nejen protaženého úžinového můstku, ale i přilehlých částí na obou kontaktech. Kovové páry o vysoké teplotě rychle expandují z povrchu kovu do okolí. Kontakty však při tom nemusí ztrácet veškerý vypařený kov. Podle okolností větší nebo menší část par zpětně kondenzuje na chladnějších částech elektrod. Zbytek se pak rozptýlí do okolí. Úbytku materiálu vypařením říkáme ztráty primární. Při velkých proudech a dlouhotrvajících obloucích přistupují ke ztrátám primárním ještě ztráty sekundární odstříkem. Je to důsledek natavení velkého množství kovu. Kov vře a páry expandující z nitra kovu strhávají s sebou kapičky roztaveného kovu. Odstříkující kov se jeví jako světelné body, létající do vzdálenosti i několika metrů. Průměr kuliček vychladlého kovu bývá i řádu milimetrů. Množství odstříknutého kovu není za jinak stejných podmínek u každého kovu stejné. Je větší u kovů, u nichž je velký rozdíl mezi teplotou tavení a teplotou varu. V tomto případě lze očekávat při dosažení teploty varu současnou existenci většího množství tekutého kovu než u materiálů s menším poměrným teplotním rozdílem mezi tavením a varem.

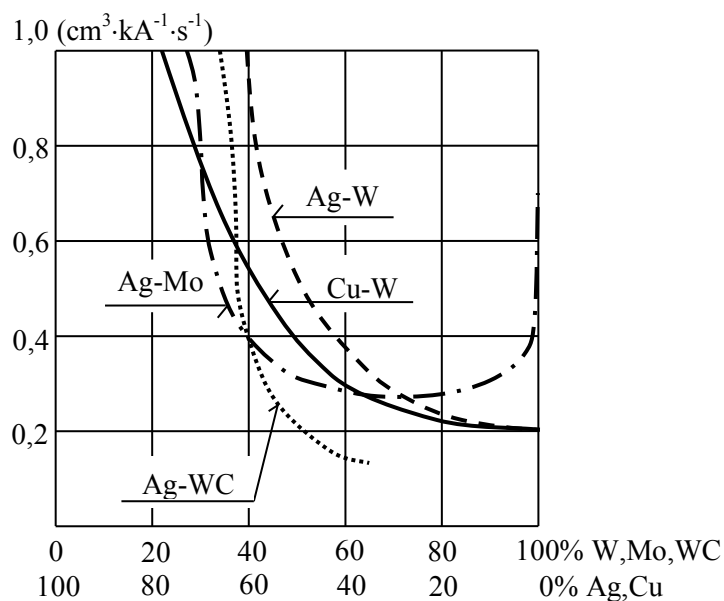
Při zkouškách životnosti kontaktních materiálů proudem mnoha tisíc ampérů není zapotřebí velkého počtu spínacích cyklů, jako je tomu v případě proudů malých a středních. Úbytky kovů při proudech v řádu 10 kA jsou značné a opotřebení kontaktů je patrné po jediném vypnutí. Realizace velkého počtu sepnutí při takových proudech není ani dobře proveditelná, neboť spínač by sotva vydržel více než několik desítek či stovek operací. Omezíme-li však při takové zkoušce počet vypnutí, je nutné seřadit zkušební zařízení tak, aby podmínky vypnutí a hoření oblouku byly vždy stejné. To znamená, že mimo velikosti proudu je nutné dodržet dobu hoření oblouku, vypínání provádět synchronně (tj. oddálení kontaktů musí započít vždy ve stejném bodě proudové křivky) a dodržet stejný zdvih kontaktů dráhově i časově. Zaručit tyto podmínky u běžného spínače je obtížné. Proto je nutné provádět zkoušky na modelových zařízeních.

Jedny z nejrozsáhlejších zkoušek životnosti materiálů při velkých proudech provedl Wilson. Výsledky zkoušek zachycuje tab. 2.1 a obr. 2.5. Úbytky materiálu nejsou uvedeny hmotnostně na jedno sepnutí, ale objemově na jednotku množství proudu protékajícího obloukem, konkrétně na 1 kA·s. K tomuto způsobu vyhodnocení úbytků vedly dvě okolnosti. V případě zkoušek materiálů podle tabulky, se jedná o kovy, které se jen málo liší svou měrnou hmotností a elektrickou vodivostí. Proto váhově zjišťované úbytky hmoty přijatelně klasifikují jejich vzájemnou životnost. V případě kontaktů zkoušených Wilsonem se jednalo o materiály s velmi rozdílnou hustotou ($C = 1,6$; $Al = 2,7$; $W = 18 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) a velmi rozdílným měrným elektrickým odporem ($C = 10^{-6}$; $Ag = 0,016\cdot 10^{-6} \Omega\cdot\text{m}$). Odpor uhlíkových kontaktů byl takový, že snížil amplitudu proudu z 25 kA oproti stříbru či mědi na 12 kA. Poměrné opotřebení vystihuje lépe jednotka $\text{cm}^3\cdot\text{kA}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ také proto, že se zkouší kontakty stejné rozměrově, ne však hmotnostně. Rozsáhlejší než zkoušky základních kovů byly zkoušky spěkaných materiálů, neboť umožnily vypracování úplných křivek úbytků pro měnící se obsah tepelně odolné složky (W , WC , Mo) v rozsahu od nuly až do 100 %. Zajímavé je zjištění, že pokud neklesne obsah tepelně odolné složky pod 60 %, je jejich životnost téměř shodná s čistým wolframem. Svými zkouškami prokázal Wilson také skutečnost, že úbytek materiálu kontaktů je při velkých proudech důsledkem vypařování a odstříku kapiček roztaveného kovu vlivem expandujících par. [1]

Srovnáme-li naměřený úbytek materiálu s vypočteným množstvím (tab. 1), které by se mělo danou energií proměnit na páry, vidíme, že až na dva nejodolnější materiály (uhlík a wolfram) je vždy naměřený úbytek větší. Větší úbytek způsobil právě odstřík, který byl největší u materiálu oblouku nejméně odolného, tj. hliníku, majícího poměrně velmi nízkou teplotu tavení.

Tab. 2.1 Úbytky materiálu kontaktů

Materiál	Naměřený úbytek ($\text{cm}^3 \cdot \text{kA}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	Vypočtený úbytek vypařením ($\text{cm}^3 \cdot \text{kA}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	Koeficient životnosti vzhledem k mědi
Uhlík	0,07	0,09	23
Wolfram	0,2	0,28	8
Molybden	0,7	0,35	2,3
Nikl	0,9	0,38	1,8
Ocel	1,1	0,42	1,5
Měď	1,6	0,60	1
Stříbro	1,65	0,65	1
Hliník	3,5	0,75	0,5



Obr. 2.5 Úbytky spěkaných materiálů

[1]

3. Provedení vakuových zhášedel dle principu působení

Zhášedlo se skládá ze dvou kontaktů, které jsou umístěny proti sobě ve vakuové nádobě (obr. 3.1). Tlak okolního plynu uvnitř vakuového pouzdra se pohybuje v rozmezí 10^{-3} až 10^{-5} Pa. Při atmosférickém tlaku 10^5 Pa je rozdíl tlaků, které musí vakuové pouzdro vydržet až úctyhodných 10^{10} Pa. K víku pouzdra je pevně připojen pevný kontakt. Druhý kontakt má možnost osového pohybu několika milimetrů při zachování dokonalé vakuové těsnosti prostřednictvím pružného členu, který se nazývá vlnovec. Za normálních podmínek obvodu je zhášedlo zapnuté a kontakty mají čelní styk. Oblouk vzniká uvnitř zhášedla oddálením pohyblivé elektrody od pevné elektrody, kterými prochází elektrický proud. Oblouk je tvořen malým množstvím kovových par, ty nadále umožňují průchod proudu, který je zhášedlu vnucen vnějším obvodem. Tyto páry postupně opouští oblast mezi kontakty a kondenzují na kontaktních plochách a na okolním stínícím krytu. Ten zabraňuje usazování par na vnitřní části vakuové nádoby. Blízko nuly proudu oblouk uhasíná, ustává vznik kovových par a rychle se obnoví původní vakuové podmínky zvyšováním dielektrické pevnosti - obvod je vypnut. K udržení oblouku je zapotřebí dosáhnout určitého minimálního proudu. Jestliže tato podmínka není splněna, dojde k useknutí proudu před přirozenou nulou. Abychom zabránili vzniku nežádoucích přepětí v indukčních obvodech, musí být snížen useknutý proud na minimum. Při použití speciálních slinutých materiálů má tento proud velikost pouze 2 až 3 A. Vzhledem k rychlému obnovení dielektrické pevnosti je oblouk bezpečně uhašen, dokonce i když dojde k oddálení kontaktu těsně před aktuální nulou. Proto je maximální opalovací čas 15 ms udáván jako maximum, v závislosti na vypínaném proudu, rozměrech zhášedla a speciální geometrii použitých kontaktů. Při rozpojených kontaktech ve vypnuté poloze je napětí obvodu odpojeno vnitřní vypínací vzdáleností a vně izolačním obalem. Pohyb kontaktu se ovládá tlakovzdušnými, pneumatickými nebo magnetickými mechanismy.

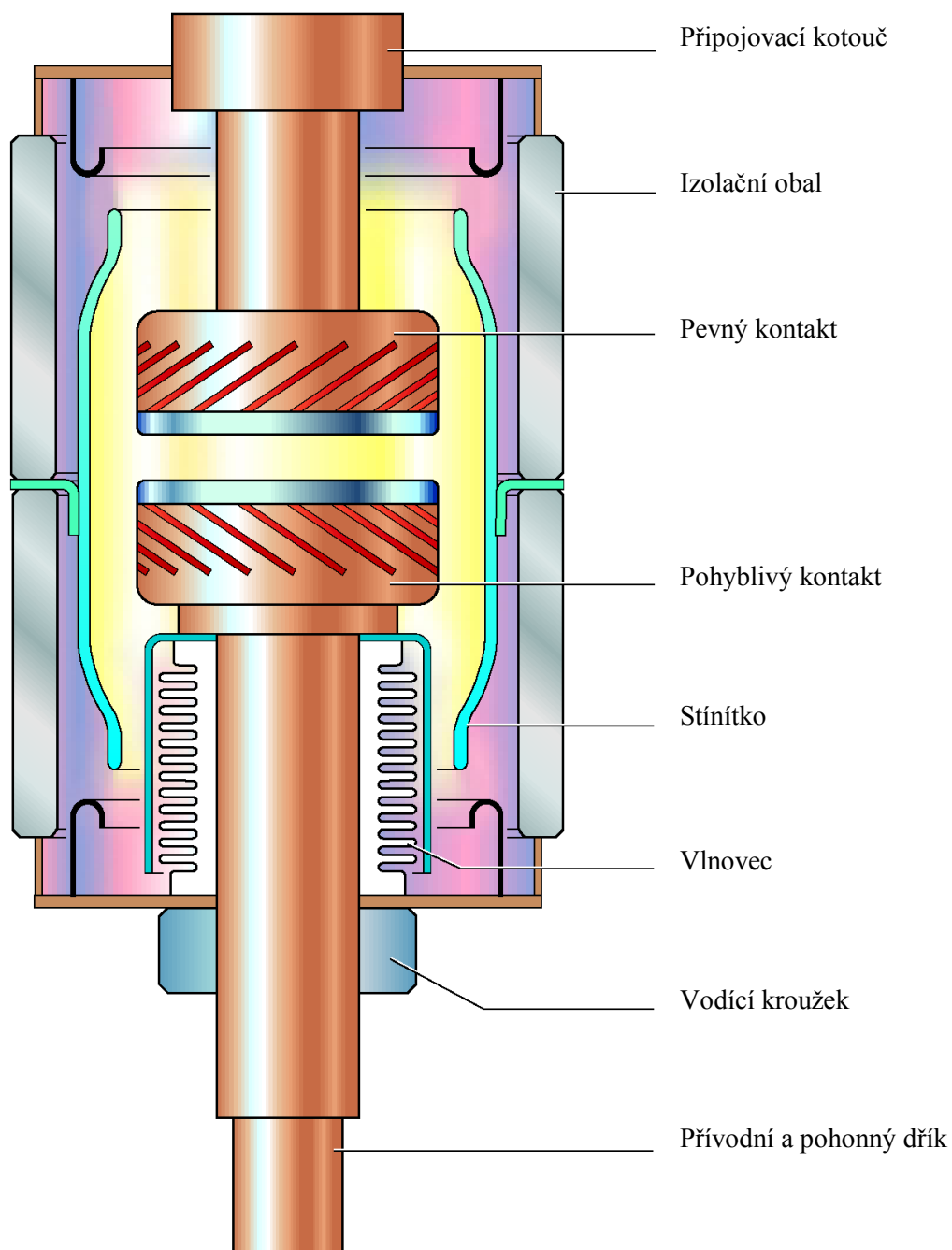
Problém stavby vakuových vypínačů je soustředěn v konstrukci jejich hlavní funkční části – vakuovém zhášedle. Jedná se zejména o konstrukci mechanicky pevné a vakuově těsné nádoby a ve volbě a technologickém zpracování kontaktních materiálů. Důležité vlastnosti některých materiálů jsou uvedeny v tabulce 2.

Tab. 3.1 Vlastnosti materiálů pro konstrukci vakuových zhášedel

Materiál	Proud katodové skvrny (A)	Kritický proud vzniku anodové skvrny (kA)	Střední velikost useknutí proudu (A)	Intenzita emise par kovu z elektrod (mg/C)
Kadmium	8 – 15			400
Bismut	3 – 5			
Zinek	5 – 20			230
Olovo	5 – 15	2,5	1,9	1100
Stříbro	60 – 100	9,7	6	35
Hliník	30 – 50	6,8	2,8	
Měď	50 – 100	10,3	4	80
Železo	60 – 100			50
Uhlík	200			
Molybden	150	13,6	14	
Wolfram	250 – 300	13,8	9,2	

Difúzní charakter oblouku limitován proudem asi 10 kA. Při zvýšení proudu nad tuto hranici přechází difúzní oblouk do vysokotlakého oblouku, jehož zhášení je ve vakuu obtížnější. [1]

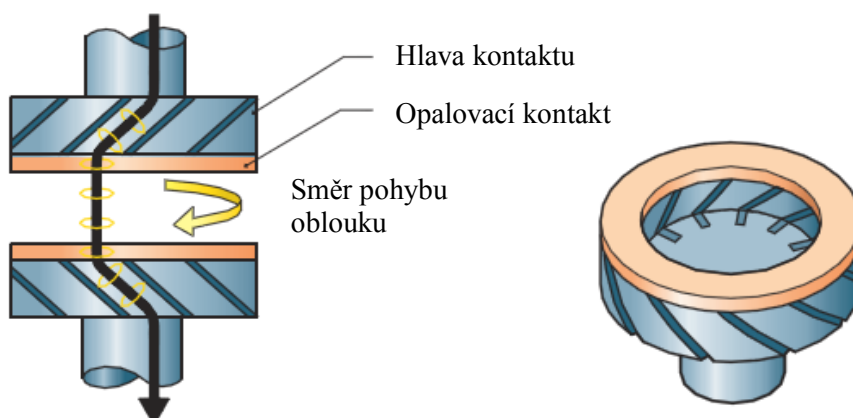
Proud ve své nule nezaniká, po komutaci proudu se anoda stává katodou, na které jsou vytvořeny podmínky pro další hoření oblouku. Zabránění vytvoření anodové skvrny, (resp. vytvoření vysokotlakého oblouku) je důležitou otázkou návrhu kontaktů a celého zhašecího systému vakuového vypínače. Z uvedených důvodů je použití prostých čelních kontaktů limitováno hranicí proudu do 10 kA. Obvykle jsou kontakty tohoto typu používány v přístrojích prostých. Ve výkonových vypínačích je praktickou možností zábrany vytvoření anodové skvrny působení vnějšího magnetického pole na oblouk. Pro vytvoření magnetického pole se vesměs využívá zvláštní konstrukce kontaktů. Existují dvě základní provedení zhašedla ta využívají buď radiální, nebo axiální magnetické pole.



Obr. 3.1 Příklad konstrukce vakuového zhašedla

[1]

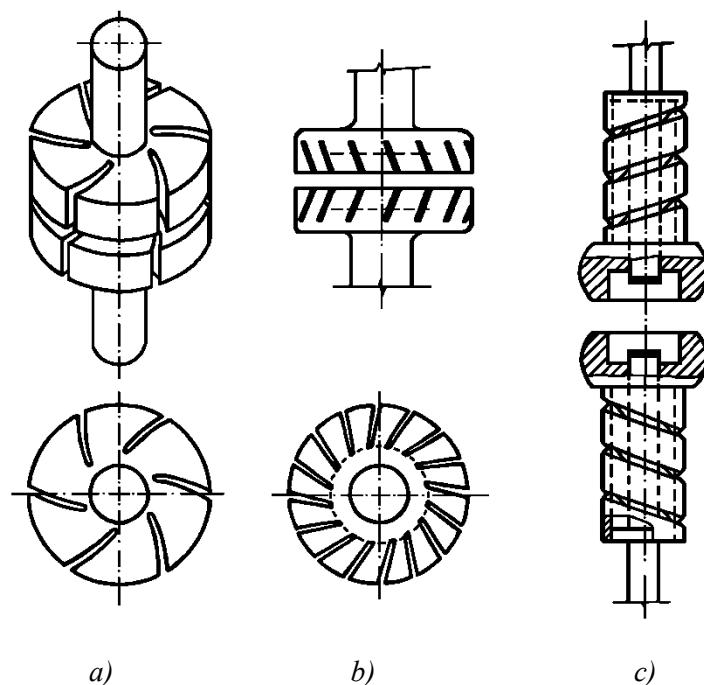
3. 1. Zhášedla využívající radiální magnetické pole



Obr. 3.2 Kontakty pracující s radiálním magnetickým polem (Siemens)

Nejstarší používané jsou konstrukce kontaktů vytvářející radiální magnetické pole (radial magnetic field – RMF). Jejich základní typy provedení jsou na obr. 3.3. Kontakt je principiálně řešen buď jako spirálový (obr. 3.3 a), nebo se zářezy (obr. 3.3 b) přičemž možná je i varianta se spirálovými stínícími elektrodami a válcovými čelními kontakty (obr. 3.3 c) - v současné době se již nepoužívá. Vzájemnou interakcí vnějšího magnetického pole vytvářeného proudem protékajícím kontakty a magnetického pole oblouku vznikají elektrodynamické síly, které uvádějí oblouk do rotace po kontaktech. Oblouk se pohybuje po kontaktech rychlostí 70 až 150 m·s⁻¹. Tím je zajištěna menší eroze, lokální přehřívání kontaktů a také se významně zlepši vypínací schopnost. Hlavní výhoda těchto kontaktů spočívá v jednoduchosti konstrukce.

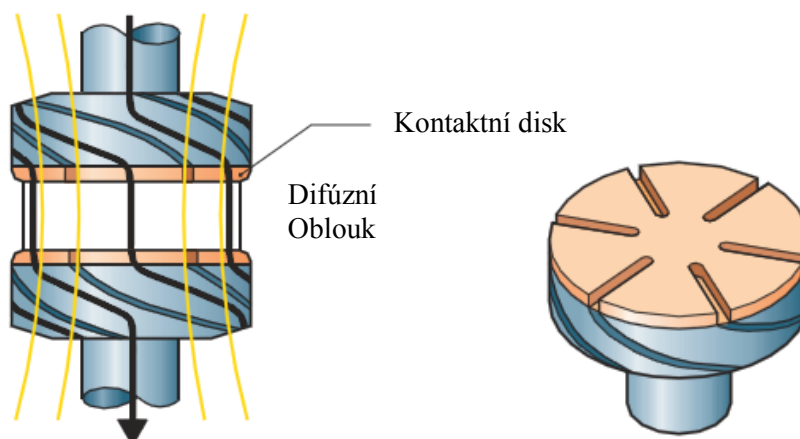
Spirálové kontakty (obr. 3.3 a) mají kruhový tvar s mírnou kuželovitostí od čelního styku k okrajům, popř. je na nich vytvořen kruhový výstupek. Okraji se kontakty nedotýkají. Činnost těchto kontaktů v oblasti malých proudů probíhá tak, že vzniklý oblouk difúzního charakteru hoří z několika katodových skvrn, které se pohybují po centrální části kontaktu. Skvrny, které se dostanou na okraj centrální části, zanikají a ostatní katodové skvrny se dělí, takže je stále zachován poměr počtu katodových skvrn vzhledem k velikosti proudu. (Pozn.: jedna katodová skvrna přenáší proud přibližně 100 – 200 A). V oblasti velkých proudů pracují tyto kontakty s vysokotlakým (kontrahovaným) obloukem, který je elektrodynamickými silami vytlačen k okrajům kontaktů. Vlivem působení radiálního magnetického pole začne oblouk po kontaktech rotovat (obr. 3.2). Tím se paty oblouku dostávají do míst s horšími podmínkami pro svou existenci, zlepšuje se časová konstanta ochlazování kontaktů a při poklesu proudu k nule oblouk přechází do difúzního tvaru. K této transformaci jedné formy oblouku do druhé dochází při proudu několika kiloampérů v čase dostatečně dlouhém před nulou proudu (400 – 500 μs). Tento čas dostačuje k tomu, aby teplota elektrod poklesla natolik, že se zmenší množství a tlak par a difúzní oblouk v přirozené nule zaniká. [1,4,5]



Obr. 3.3 Kontakty využívající radiální magnetické pole

U kontaktu se šikmými zářezy (obr. 3.3 b) oblouk hoří ve stádiu dělených paralelních oblouků difúzního charakteru na obvodu kontaktů. Difúzní sloupce pod účinkem radiálního magnetického pole, vytvořeného průtokem proudu šikmými zářezy, rotují v prostoru mezi čelními plochami kontaktů. Vzniká tak rotující útvar difúzních sloupců, jejichž rychlý pohyb po anodě zabraňuje vzniku anodové skvrny. Správná funkce těchto kontaktů je spojena s vhodným návrhem šířky a sklonu zářezů. Pokud by byly zářezy příliš široké, mohl by oblouk na konci své dráhy zůstat hořet na jednom místě a tím dojít k přehřátí části kontaktu. V opačném případě – při příliš úzkých zářezech, by mohlo dojít k zaplnění těchto zářezů roztaveným kontaktním materiálem. Tím by došlo k vytvoření přímé vodivé cesty, nevzniklo by požadované radiální magnetické pole a oblouk by opět hořel na jednom místě. Tento typ kontaktů také vyžaduje zvýšenou pozornost ve výběru materiálu kontaktů (odolnost proti svaření a nízká úroveň usekávání proudu). [1,4,5]

3. 2. Zhášedla využívající axiální magnetické pole



Obr. 3.4 Kontakty pracující s axiálním magnetickým polem (Siemens)

Aby oblouk zůstal v difúzní podobě je potřeba splnit následující podmínky:

- Indukce působící v axiálním směru musí být dostatečně velká (experimentálně bylo zjištěno: $B = 3,9 \text{ mT}$ na každých 10 kA proudu).
- Plocha kontaktu musí být dostatečně velká pro daný proud (proudová hustota nesmí překročit $17 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$).

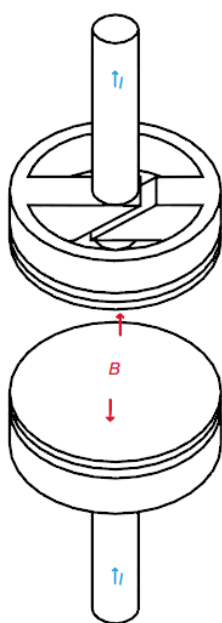
Axiální magnetické pole (axial magnetic field – AMF) lze vytvořit několika způsoby s využitím proudu, který má být vypnut. Jednou z možností je použití cívek začleněných do kontaktů (obr. 3.4). Jinou možností je použití externí cívky, která obklopuje zhášedlo. Přidáním cívky se zvětší celkový odpor kontaktů, proto jsou tato zhášedla nevhodná tam, kde se používají velké průchozí proudy. Výhoda těchto kontaktů spočívá ve skutečnosti, že tvary kontaktů nejsou tak hranaté jako u kontaktů pracujících s radiálním magnetickým polem a tak méně ovlivňují izolační pevnost zhášedla. Proto jsou vhodné pro aplikace pracující s vysokým napětím.

Mimo starší konstrukce, které využívaly zvláštního uspořádání spirálových kontaktů, popř. konstrukce využívající vnější tvarování proudovodné dráhy, se objevila dvě provedení kontaktů vytvářejících průchodem proudu axiální magnetické pole. První pracují s tzv. jednotným polem (obr. 3.4). Přestože je tento typ kontaktů velice účinný, objevuje se u něj problém v tom, že po nule proudu je zbytkový ionizovaný sloupec stále fixován mezi kontakty polem od zbytkového proudu a ionizované částice mají poměrně malý prostor pro difúzi, což ovlivňuje rychlost nárůstu elektrické pevnosti mezi kontakty. Pro odstranění tohoto jevu byly vyvinuty tzv. mnohapolové kontakty, jejichž uspořádání je naznačeno na obr. 3.5 až 3.8.

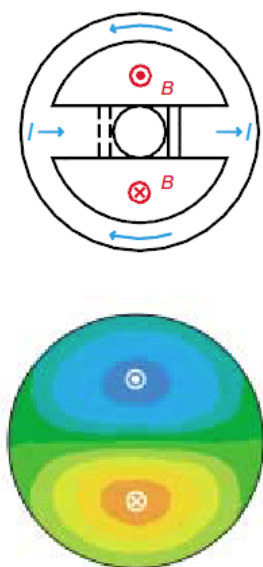
Konstrukce bipolárních kontaktů zajišťuje vytvoření magnetického pole opačné polarity v sousedních kvadrantech proudovodné dráhy děleného kontaktu a tím je dosaženo velmi nízké intenzity pole v ose kontaktů při průchodu malých (zbytkových) proudů. Při průchodu zkratového proudu se intenzita pole v rozhodující oblasti kontaktu (30 – 70% průměru) nemění.

Princip, na kterém je založen nově vyvinutý kvadrupolární kontaktní systém je vidět na obr. 3.7 a 3.8. Na rozdíl od bipolárního kontaktu tento princip nevyužívá cívky pro vytvoření AMF, ale hybridního uspořádání, které tvoří magnetický obvod a drážky na kontaktním disku. Magnetický obvod je tvořen z feromagnetického materiálu, jehož prostřednictvím je veden magnetický tok. [1,4,5]

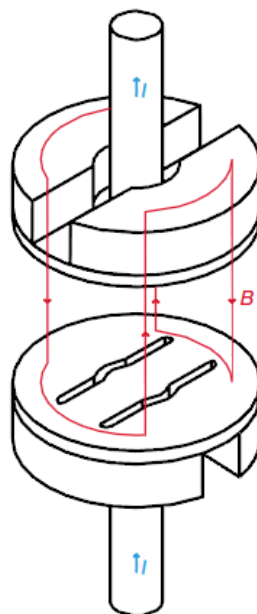
Pole disků jsou uspořádány takovým způsobem, že tok kříží kontaktní mezeru celkem 4x během jednoho oběhu, čímž se generuje kvadrupolární AMF. Když jsou kontakty rozepnuty, drážky v kontaktním disku nutí část proudu tvořit smyčky, aby mohly zásobovat paty oblouku na elektrodě. Tvar této smyčky posiluje magnetické pole. Obr. 3.8 ukazuje indukci uprostřed mezi kontakty. Jsou zde jasně viditelné čtyři sektory. Pokud jde o rozložení indukce ta je v každém sektoru stejná, ale jejich polarita je opačná. V případě kvadrupolárního kontaktního systému je indukce na „kříži“ oddělující čtyři sektory nulová. Stejně jako u bipolárních kontaktů je AMF poměrně silné ve vnějších oblastech kontaktní mezery. Hlavními parametry pro správný návrh těchto kontaktů jsou velikost, rozložení a fáze ve vztahu k axiálnímu magnetickému poli. V ideálním případě nulový fázový posuv mezi průchozím proudem a generovaným magnetickým polem. Důležitým parametrem jsou vířivé proudy vytvořené v kontaktním disku měnící se magnetickou indukcí. Vířivé proudy jsou zodpovědné za fázový posuv i zmenšení axiálního magnetického pole. Protože tyto vířivé proudy vznikají pouze v ohraničených oblastech kolmo na magnetické siločáry, jsou menší než v unipolárním kontaktním systému, to způsobí snížení přídavných ztrát. Nežádoucí účinek na velikost a fázi magnetické indukce je tedy případě bipolárního i kvadrupolárního systému snížena.



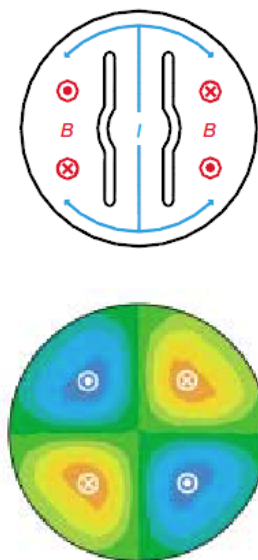
Obr. 3.5



Obr. 3.6



Obr. 3.7



Obr. 3.8

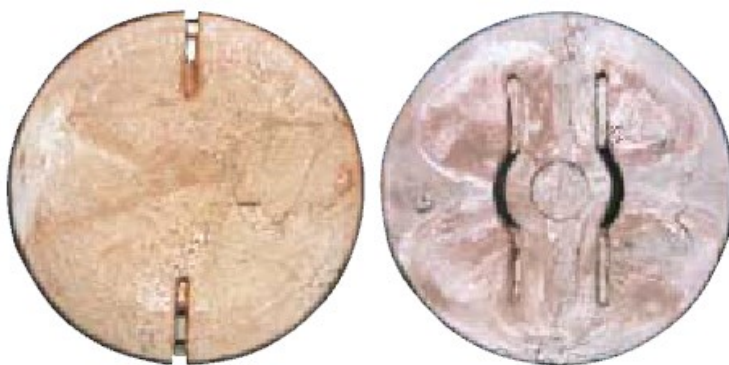
Obr. 3.5 Pracovní princip bipolárního AMF kontaktního systému. Cívky za každým kontaktním diskem generují bipolární magnetické pole mezi kontakty.

Obr. 3.6 Rozložení magnetické indukce ve střední rovině mezi kontakty bipolárního AMF kontaktního systému.

Obr. 3.7 Pracovní princip kvadrupolárního AMF kontaktního systému. Axiální magnetické pole je vytvořeno hybridním uspořádáním sestávajícím se z magnetického obvodu a drážek v kontaktním disku.

Obr. 3.8 Rozložení magnetické indukce ve střední rovině mezi kontakty kvadrupolárního AMF kontaktního systému.

[1,4,5]



Obr. 3.9 Kontaktní povrch bipolárního a kvadrapolárního kontaktního systému po opakovaném vypnutí zkratového proudu (63 kA, Průměr kontaktu $d=100$ mm, ABB)

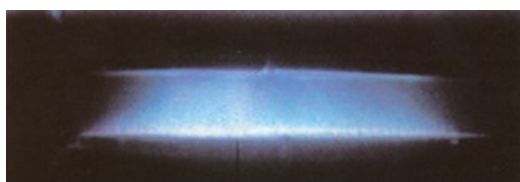
Z obr. 3.10 je dobře patrná forma jednotlivých typů oblouků hořících v kovových parách mezi kontakty. Tvar a velikost kontrahovaného oblouku hořícího v radiálním zhášení lze charakterizovat jako tenký mírně prohnutý válec. Tento tvar byl použit pro numerický model v kapitole 5.



Kontrahovaný oblouk hořící mezi kontakty vakuového vypínače v radiálním poli.
($i = 40$ kA)



Difúzní oblouk v radiálním poli před průchodem proudu nulou.
($i = 2$ kA)



Difúzní oblouk hořící mezi kontakty vakuového vypínače v axiálním poli.
($i = 60$ kA)



Difúzní oblouk v axiálním poli před průchodem proudu nulou.
($i = 10$ kA)

Obr. 3.10 Srovnání formování oblouku radiálním a axiálním polem

[1,4,5]

4. Silové a tepelné účinky elektrického proudu

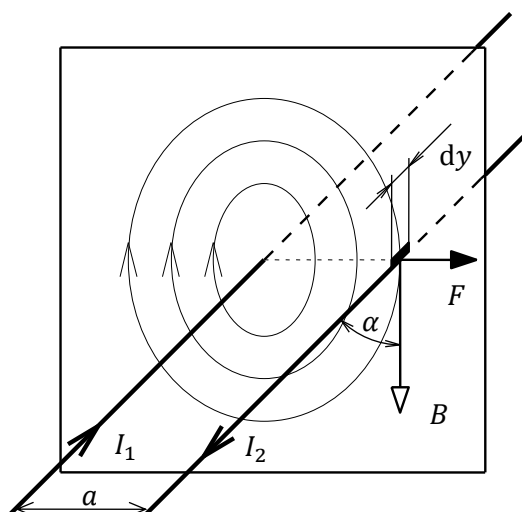
4.1. Silové účinky elektrického proudu

Prochází-li vodičem elektrický proud, vytváří kolem vodiče magnetické pole. Interakcí magnetických polí vodičů nebo jejich částí vznikají síly, které jsou nazývány vzhledem k jejich povaze elektrodynamické. Orientace magnetických polí (tzn. vzájemná poloha vodičů nebo jejich úseků) a smysl průchodu proudu určují směr a smysl působící síly. Velikost elektrodynamické síly je možné obecně vypočítat buď ze změny magnetické energie soustavy, nebo podle Biot-Savartova (Laplaceova) zákona.

Síly působící mezi rovnoběžnými vodiči

Nachází-li se v magnetickém poli o indukci B vodič, kterým protéká proud I_2 (obr. 4.1), působí na element jeho délky dy síla:

$$dF = I_2 \cdot (B_y \times dy) \quad (4.1)$$



Obr. 4.1 Vodič v magnetickém poli

Element síly F ve skalárním tvaru:

$$dF = I_2 \cdot B_y \cdot \sin(\alpha) \cdot dy \quad (4.2)$$

Síla je největší pro $\sin(\alpha) = 1$ ($\alpha = 90^\circ$), tj. když v uvažovaném místě probíhá magnetické pole kolmo na směr proudu. Výsledná síla působí ve směru kolmém na rovinu danou vodičem I_2 a směrem indukce B . Na úseku vodiče délky l_2 působí celková síla:

$$F = I_2 \cdot B_y \cdot \int_0^{l_2} dy = I_2 \cdot B_y \cdot l_2 \quad (4.3)$$

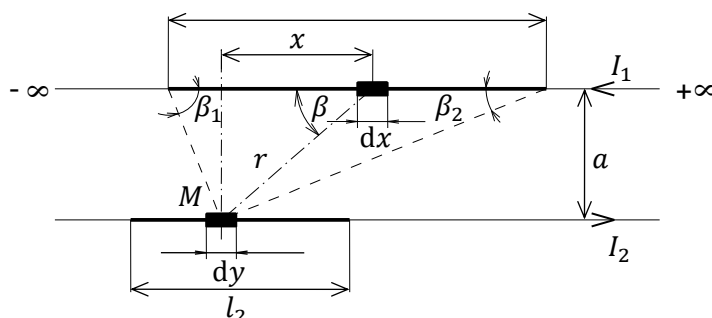
Pro stanovení velikosti magnetické indukce B_y , vycházíme z Biot-Savartova zákona: každý element vodiče, kterým protéká proud I_1 , vytvoří v elementu dx magnetické pole s indukcí:

$$B_y = \frac{\mu_R \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I_1}{r^3} \cdot (r \times dx) \quad (4.4)$$

[3]

Ve skalárním tvaru:

$$dB_y = \frac{\mu_R \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I_1 \cdot \frac{\sin(\beta)}{r^2} dx \quad (4.5)$$



Obr. 4.2 Vyznačení úhlů a délek

Úhel β svírá spojnice r se směrem elementu dx ; v tomto případě dvou přímých vodičů se směrem vodiče a proudem I_1 . Celková indukce v místě M (obr. 4.2) je pak dána součtem příspěvků všech elementů vodiče l_1 od β_1 do β_2 :

$$B_y = \frac{\mu_R \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I_1 \cdot \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\sin(\beta)}{r^2} dx \quad (4.6)$$

Pro r a element dy si vyjádříme ze známých veličin:

$$\begin{aligned} \sin(\beta) &= \frac{a}{r}; \dots r = \frac{a}{\sin(\beta)}; \dots \operatorname{tg}(\beta) = \frac{a}{x}; \dots x = \frac{a}{\operatorname{tg}(\beta)} = a \cdot \frac{\cos(\beta)}{\sin(\beta)}; \dots \\ dx &= a \cdot \frac{-\sin^2(\beta) - \cos^2(\beta)}{\sin^2(\beta)} \cdot d\beta = -\frac{a \cdot d\beta}{\sin^2(\beta)} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Po dosazení do vzorce (4.6) je velikost indukce B_y v libovolném místě od proudového úseku l_1

$$\begin{aligned} B_y &= -\frac{\mu_R \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I_1 \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\sin^2(\beta)}{a^2} \cdot \frac{a}{\sin^2(\beta)} \cdot d\beta = -10^{-7} \cdot \frac{I_1}{a} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin(\beta) \cdot d\beta \\ B_y &= 10^{-7} \cdot \frac{I_1}{a} \cdot (\cos(\beta_2) - \cos(\beta_1)) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Je-li vodič l_1 nekonečně dlouhý, pohybuje se element dx od $-\infty$ do $+\infty$ a úhly β se mění od 180° do 0° . Pak platí:

$$B_{y\infty} = 10^{-7} \cdot \frac{I_1}{a} (\cos(0) - \cos(\pi)) = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{I_1}{a} \quad (4.9)$$

[3]

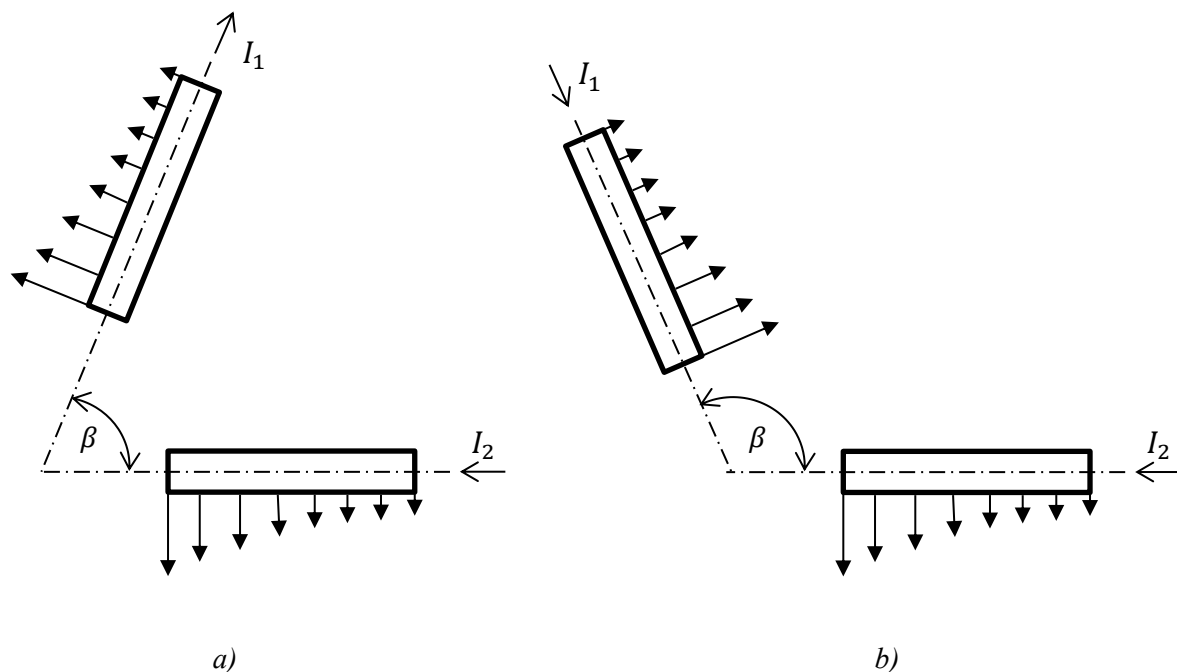
Výsledná síla na délce vodiče l_2 s proudem I_2 vyvolaná magnetickým polem nekonečně dlouhého vodiče l_1 s proudem I_1 je proto:

$$F = B_{y\infty} \cdot I_2 \cdot l_2 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{l_2}{a} \cdot I_1 \cdot I_2 \quad (4.10)$$

Pro různé uspořádání proudovodné dráhy se vychází z těchto základních vztahů.

Síly působící na pravoúhlý záhyb

Pro vysvětlení vzniku síly působící na elektrický oblouk ve zhášedle, je podstatné pochopit síly působící na pravoúhlý záhyb. Protože tento záhyb je součástí konstrukce kontaktního systému. Tento záhyb si můžeme představit jako dva úseky přímých vodičů, jejichž osy se protínají pod úhlem β . Velikost a působení dynamických sil je dána jejich uspořádáním a smyslem proudu v nich. Prochází-li proud úseky vzhledem k jejím osám průběžně (obr. 4.3 a) snaží se úhel jejich os rozevřít (záhyb se narovnává). Prochází-li v jednom úseku opačně, tzn. oba proudy I_1 a I_2 směřují do, nebo z průsečíků os, síly tlačí vodiče k sobě (úseky se přitahují – záhyb se svírá obr. 4.3 b)



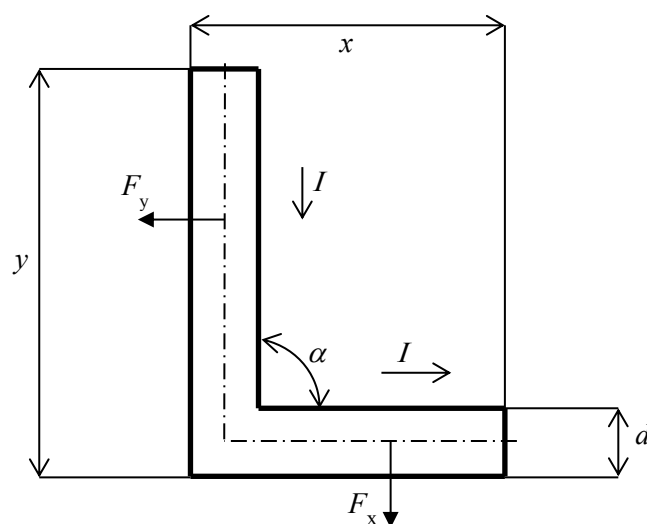
Obr. 4.3 Síly působící na části vodičů pod úhlem β

Zjednodušené rovnice popisující horizontální (x) a vertikální (y) sílu působící na vodiče, kde k_1 až k_4 představují konstanty reprezentující geometrické vlastnosti částí vodičů (délka, šířka, vzdálenosti...).

$$F_x = 10^{-7} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{\sin(\alpha)} \cdot [\ln(k_1) - \cos(\beta) \cdot \ln(k_2)] \quad (4.11)$$

$$F_y = 10^{-7} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{\sin(\alpha)} \cdot [\ln(k_3) - \cos(\beta) \cdot \ln(k_4)] \quad (4.12)$$

[3]



Obr. 4.4 Pravoúhlý záhyb

V případě spojitého pravoúhlého záhybu podle obr. 4.4, jak v praxi nejčastěji přichází v úvahu, jest $\beta = 90^\circ$ se vzorce (4.11,4.12) významně zjednoduší.

$$F_x = 10^{-7} \cdot \frac{I^2}{\sin(\beta)} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot x}{d}\right) \cdot \frac{y + \sqrt{y^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2}}{y + \sqrt{y^2 + x^2}} \quad (4.13)$$

$$F_y = 10^{-7} \cdot \frac{I^2}{\sin(\beta)} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot y}{d}\right) \cdot \frac{x + \sqrt{x^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2}}{x + \sqrt{y^2 + x^2}} \quad (4.14)$$

[3]

4. 2. Tepelné účinky elektrického proudu

Teplo se šíří z místa vzniku do okolí třemi způsoby: vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a sáláním (zářením, radiací). Vedením se teplo šíří především v pevné hmotě. V kapalinách se uplatňuje převážně proudění, vedení částečně. V plynech se teplo přenáší všemi třemi způsoby, přitom vedením jen v omezené míře. Ve vakuu se teplo šíří jen sáláním. Matematicky exaktně zachytitelné je šíření tepla tehdy, probíhá-li jen jedním způsobem. V modelu vakuového zhášedla bude uvažováno s konvekcí v pevných materiálech (kontakty, víko, keramické pouzdro) a s radiací ve zhášecím médiu – vakuu. Veškeré teplo bude odváděno z jednotlivých ploch pomocí součinitele přestupu tepla do okolí. Výpočet bude proveden dvěma způsoby a to pomocí numerických metod v programu ANSYS a výpočtem pomocí tepelné sítě, který bude zejména sloužit ověření správnosti numerického modelu.

Tab. 4.1. Velikost dovoleného oteplení

Konstrukční část, materiál, izolace zhášedla		Maximální dovolené oteplení při teplotě okolí (°C)	
		35 °C	40°C
Kontakty na vzduchu	Stříbrné	70	65
	Měděné, plátované stříbrem	70	65
	Měděné, postříbřené	60	65
	Měděné	40	35
Svorky pro vnější přírůdky		50	45
Kovové části ve styku s izolanty třídy	Y (neimpregnované materiály)	55	50
	A (impregnované materiály)	65	60
	B ve vzduchu	95	90
	C v oleji	65	60

Princip tepelné sítě

Nutným předpokladem pro analytické řešení je homogenita prostředí. Jedná-li se o takové stejnorodé prostředí, vytváří se v něm tepelné pole, které je podobné jako pole elektrostatické či pole proudové polem skalárním. Jeho potenciální veličinou je buď teplota, nebo oteplení. Její rozložení v prostoru se zdroji popisuje Laplaceova a Poissonova rovnice:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} = 0 \qquad \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} = -\frac{q}{\lambda} \quad (4.15)$$

Proto je řešení polí tepelných, analogické k řešení polí elektrických. Pole popisují zase navzájem kolmé soustavy teplotních spádnic a hladinových (izotermických) ploch. Výsledné vztahy pro tepelný tok v tepelně vysoce vodivých materiálech (kovech) mají formálně stejná znění jako vzorce pro vedení proudu v elektrických obvodech. V plné míře by analogie platila jen tehdy, kdyby byla obě pole přesně stejná. To znamená, kdyby se ztotožňovaly izotermy s elektrickými ekvipotenciálami. Ve skutečnosti shoda nebývá úplná a to proto, že rozdíl mezi tepelnou vodivostí kovů a izolantů je o několik řádů menší než mezi jejich vodivostmi elektrickými. Izolace na kovovém vodiči je z hlediska elektrického proudu téměř ideální, izolantem neteče žádný proud. Z hlediska tepelného představuje prostředí, kterým odtéká do okolí ne vždy zanedbatelná část tepla. Tvary polí se tedy v obou případech poněkud liší. Přesto lze v praxi tuto analogii v řadě případů uplatnit a tepelný tok počítat bez velké chyby podle jednoduchých, převážně lineárních vztahů. [3]

Vycházíme-li z analogie mezi polem tepelným a elektrickým zjišťujeme, že velikost tepelného toku, je vázána k teplotnímu spádu $\vartheta = T_1 - T_2$, který tok vyvolává, podobným zákonem jako je Ohmův zákon.

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{R_T} = \frac{\vartheta}{R_T} \quad (4.16)$$

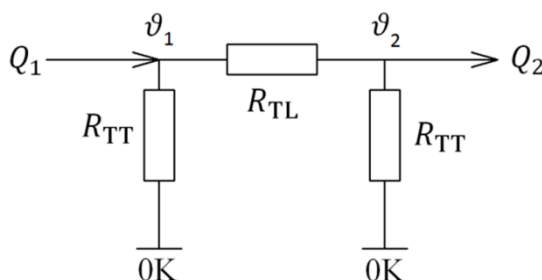
Při měrné tepelné vodivosti materiálu vykazuje tyč o konstantním průřezu a dané délce tepelný odpor.

$$R_T = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S} \quad (4.17)$$

Vakuové zhášedlo si lze představit jako soubor různých těles, z nichž jen v některých vzniká teplo. Toto teplo pak proudí z místa vzniku do sousedních těles a přes ně postupně až k rozhraní mezi souborem těles a vnější atmosférou. Tímto rozhraním, tj. ochlazovacím povrchem, se předává do prostoru. Protože většinu úseků proudovodné dráhy tvoří tyče, jimiž část tepla protéká ve směru jejich osy do sousedního dílce a část tepla se odvádí do okolí jejich povrchem, zavádíme je do tepelné sítě odpovídajícími náhradními schématy. Výhodou jednořadové tepelné sítě je možnost jejího přímého početního řešení.

Dílec beze ztrát

Dílec, v němž žádné nové teplo nevzniká, ale ze vstupujícího tepla Q_1 se část odvádí jeho povrchem, takže z dílce ze kterého vystupuje tok $Q_2 < Q_1$ se nazývá dílec beze ztrát. Uvažujme dílec z homogenního materiálu o konstantním průřezu S , jímž ve směru jeho délky protéká tepelný tok Q .



Obr. 4.5 Tyč beze ztrát – náhradní π článek

Pro tok na začátku a na konci tyče platí následující vztahy

$$Q_1 = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{R_{TL}} + \frac{\vartheta_1}{R_{TT}} \quad Q_2 = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{R_{TL}} - \frac{\vartheta_2}{R_{TT}} \quad (4.18)$$

Při uspořádání tepelných odporů R_{TL} a R_{TT} do tvaru π – článku podle obr. 4.5 je tedy náhradním schématem tyče, z níž se odvádí teplo povrchem do okolí. Tento π – článek je tvořen podélným (longitudinálním) odporem R_{TL} a dvěma příčnými (transversálními) odpory R_{TT} v uzlech tepelného obvodu.

$$R_{TL} = \frac{\sinh(\beta_T \cdot l)}{\delta_T} \quad R_{TT} = \frac{1}{\delta_T \cdot \tanh\left(\frac{\beta_T \cdot l}{2}\right)} \quad (4.19)$$

Pro dva krajní případy lze uvedené vztahy pro výpočet odporů tepelné sítě vhodně upravit. Jedná se o případ "tepelně krátké tyče" a o případ "tepelně dlouhé tyče". [3]

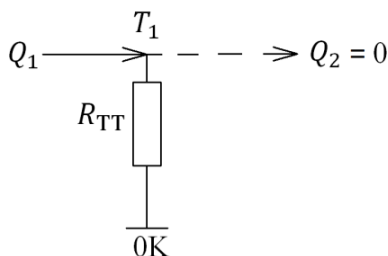
O tepelně krátké tyči hovoříme, je-li číselná hodnota výrazu $\beta_T \cdot l \ll 1$. Pak můžeme psát: $\sinh(\beta_T \cdot l) \approx \tanh(\beta_T \cdot l) \approx \beta_T \cdot l$. Za tohoto stavu může zapsat tyto rovnice:

$$R_{TL} = \frac{\sinh(\beta_T \cdot l)}{\delta_T} = \frac{\beta_T \cdot l}{\delta_T} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S} = R_T \quad R_{TT} = \frac{1}{\delta_T \cdot \tanh\left(\frac{\beta_T \cdot l}{2}\right)} = \frac{2}{\delta_T \cdot \beta_T \cdot l} = \frac{2}{\alpha_0 \cdot O \cdot l} \quad (4.20)$$

Pro tepelně krátkou tyč je tedy podélný odpor náhradního schématu R_{TL} roven skutečnému tepelnému odporu tyče R_T . Každý z příčných odporů R_{TT} je roven polovině odporu pro přestup tepla z tyče (s konstantní teplotou po celé délce) povrchem do okolí. Případ tepelně dlouhé tyče nastává naopak pro $\beta_T \cdot l \gg 1$ (tj. pro velikost cca 10 a větší). Pro $\beta_T \cdot l \geq 10$ lze uvažovat, že $\sinh(\beta_T \cdot l) \approx \sinh(\infty) = \infty$; $\tanh(\beta_T \cdot l) \approx \tanh(\infty) = 1$. Vztahy pro odpory náhradního schématu budou ve tvaru:

$$R_{TL} = \infty \quad R_{TT} = \frac{1}{\delta_T} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_0 \cdot O \cdot \lambda \cdot S}} \quad (4.21)$$

Nekonečná velikost podélného odporu mezi uzly představujícími konce tyče znamená, že žádný vstupující tepelný tok se nedostane na konec tyče. Odpor R_{TT} , charakterizující odvod tepla z tyče chlazením, nezávisí na délce tyče a má za daných podmínek minimální možnou velikost. Prakticky se pak náhradní schéma tepelně dlouhé tyče redukuje na vstupní příčný odpor dle obrázku 4.6.



Obr. 4.6 Tyče beze ztrát - tepelně dlouhá tyč

Dílce se ztrátami

Jestliže průtokem proudu v každé jednotce homogenního objemu dílce vzniká teplo $q = \varrho \cdot J^2$, pak v elementu tyče konstantního průřezu vzniká teplo $qSdx$. Tento dílec nazýváme dílec se ztrátami. Kdybychom uvažovali, že elementem uvolněné teplo se odvede do okolí povrchem Odx a žádné jiné teplo se do elementu nepřivádí, ani se z něj neodvádí, bylo by ustálené oteplení elementu, resp. celé tyče ϑ_∞ dáno vztahem:

$$\vartheta_\infty = \frac{q \cdot S \cdot dx}{\alpha_0 \cdot O \cdot dx} = \frac{q \cdot S}{\alpha_0 \cdot O} \quad (4.22)$$

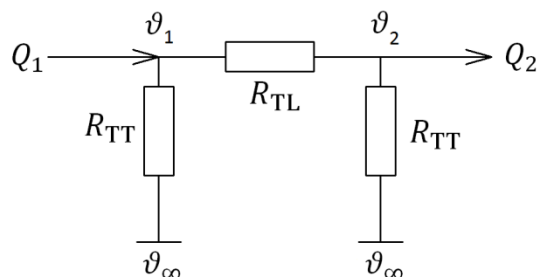
Pro tok na začátku a na konci tyče platí následující vztahy:

$$Q_1 = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{R_{TL}} + \frac{\vartheta_1 - \vartheta_\infty}{R_{TT}} \quad Q_2 = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{R_{TL}} - \frac{\vartheta_2 - \vartheta_\infty}{R_{TT}} \quad (4.23)$$

Náhradním schématem tyče je opět π -článek. Jediný rozdíl proti tyči beze ztrát je okolnost, že oteplení vnějších konců příčných odporů není nulové, ale konečné (viz obr. 4.7), dané vztahem (4.24).

[3]

$$\vartheta_{\infty} = \frac{q \cdot S}{\alpha_0 \cdot O} = \frac{\varrho \cdot J^2 \cdot S}{\alpha_0 \cdot O} = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot O} \quad (4.24)$$

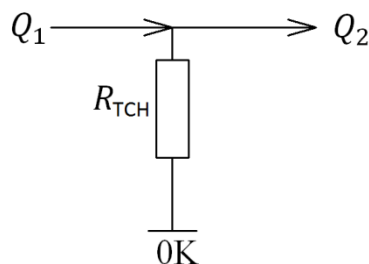


Obr. 4.7 Tyče se ztrátami – náhradní π článek

Podobně jako v případě tyčí beze ztrát jsou krajní případy tyčí se ztrátami tepelně krátké a dlouhé tyče. Jejich schémata se liší jen oteplením konců příčných větví (viz obr. 4.5 a obr. 4.7).

Základní prvky tepelné sítě použité pro výpočet

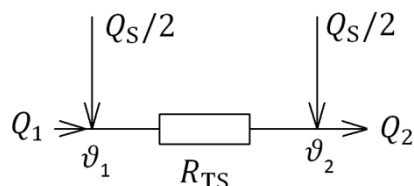
- Tyče se ztrátami konstantního průřezu. Jejich náhradním schématem je π -článek dle obr. 4.7 a platí pro něj rovnice uvedené v oddílu dílce se ztrátami. Tento prvek byl použit na tyto části vakuového zhášedla: roubíky kontaktů uvnitř pouzdra, hlavy kontaktů, kontaktní disky.
- Těleso bez vlastních ztrát, navazuje příčně na vlastní podvodnou dráhu a veškeré své vstupující teplo Q_1 předává svým povrchem do okolí. Je to obdoba chladicího členu, jehož tepelný odpor počítáme podle vzorce 4.25. Schéma chladicího prvku je na obr. 4.8. Tento prvek byl použit na tyto části vakuového zhášedla: horní víko, spodní víko.



$$R_{TCH} = \frac{1}{\alpha_0 \cdot P} \quad (4.25)$$

Obr. 4.8 Schéma chladicího členu

- Kontaktní styk, jehož náhradní schéma uvádí obr. 4.9 je jednou z možností jak modelovat kontaktní styk. Toto schéma odpovídá skutečnosti, že z povrchu úžiny (nepatrných rozměrů) se do okolního izolačního prostředí téměř žádné teplo nepředává a protože oteplení uprostřed úžiny nemá prakticky žádný význam, dostačují nám hodnoty na mezních hladinách úžiny.

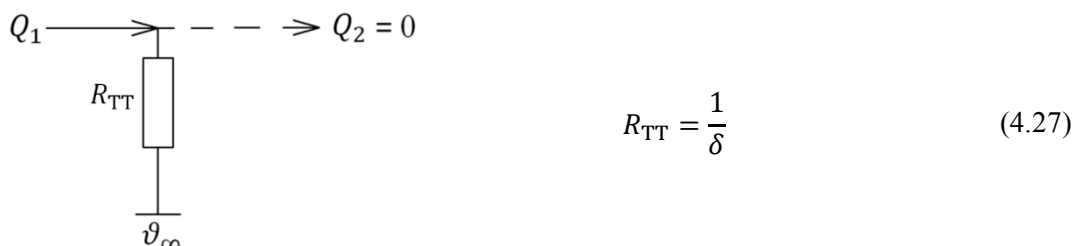


$$R_{TS} = \frac{k}{\varrho \cdot \lambda \cdot F^n} \quad Q_S = k \cdot I^2 \cdot F^{-n} \quad (4.26)$$

Obr. 4.9 Schéma kontaktního styku

[3]

- d) Tepelná síť spínacích přístrojů končí oboustranně přívody. I když přívody nejsou součástí vlastního přístroje a připojují se k jeho svorkám až při uvedení do provozu, musíme jejich tepelný vliv respektovat. Dovolené oteplení přívodu je nižší, než oteplení proudovodné dráhy přístroje a proto se významně podílí na jejím chlazení. Přívody považujeme vždy za tepelně dlouhou tyč, tak že jejich náhradní schéma se redukuje na příčnou větev dle obrázku 4.10.



Obr. 4.10 Schéma přívodu

Souhrnná chladivost povrchu (součinitel přestupu tepla do okolí)

Při měření odvodu tepla z povrchu tělesa do plynného okolí nelze oddělit konvekci od záření. Oba způsoby přenosu tepla působí vždy současně. Sálání lze osamostatnit jedině ve vakuu, neboť tam konvekce neexistuje. Naopak samotná konvekce přichází v úvahu ve většině případů chladicích kapalin, neboť v nich zase prakticky úplně zaniká záření. Při tomto postupu předpokládáme, že teplota okolí i chlazených stěn je stejná pro oba jevy. To je další zjednodušení skutečných poměrů, neboť teplota vzduchu v blízkosti tělesa, směrodatná pro proudění, nemusí být stejná s teplotou ve vzdáleném okolí, danou pro sálání. Obecná mocnná závislost měrné chladivosti na oteplení povrchu ϑ_p nedovoluje rozvinutí analytického řešení tepelných výpočtů. Abychom takový postup umožnili, upravujeme tuto závislost linearizací do náhradního tvaru.

$$\alpha_0 = \alpha_K + k \cdot \alpha_Z \quad \alpha_0 = A + B \cdot \vartheta_p \quad (4.28)$$

Několik linearizovaných vztahů pro α_Z při různé emisivitě sálající plochy a různé teplotě okolí je uvedeno v tabulce 4.2, v téže tabulce jsou uvedeny náhradní vztahy pro měrnou chladivost.

Tab. 4.2 Měrná chladivost za daných podmínek

Měrná chladivost zářením	Podmínky	Měrná chladivost konvekci	Podmínky
$6,3 + 0,038 \cdot \vartheta_p$	$E_Z = 0,9; T_R = 40^\circ\text{C}$	$3,0 + 0,03 \cdot \vartheta_p$	Svislá stěna, $h = 0,3$. Vodorovný válec, $d = 0,3$ m.
$6,0 + 0,037 \cdot \vartheta_p$	$E_Z = 0,9; T_R = 35^\circ\text{C}$		Vodorovná plocha chlazená nahoru, šířka $h = 0,3$ m.
$5,6 + 0,034 \cdot \vartheta_p$	$E_Z = 0,8; T_R = 40^\circ\text{C}$	$3,3 + 0,035 \cdot \vartheta_p$	Dtto; $h=d=0,2$ m
$5,4 + 0,033 \cdot \vartheta_p$	$E_Z = 0,8; T_R = 35^\circ\text{C}$	$3,7 + 0,046 \cdot \vartheta_p$	Dtto; $h=d=0,1$ m
$2,8 + 0,017 \cdot \vartheta_p$	$E_Z = 0,4; T_R = 40^\circ\text{C}$	$4,3 + 0,055 \cdot \vartheta_p$	Dtto; $h=d=0,05$ m
$2,7 + 0,016 \cdot \vartheta_p$	$E_Z = 0,4; T_R = 35^\circ\text{C}$	$6,0 + 0,09 \cdot \vartheta_p$	Dtto; $h=d=0,01$ m
$1,1 + 0,006 \cdot \vartheta_p$	$E_Z = 0,15; T_R = 40^\circ\text{C}$	$7,0 + 0,12 \cdot \vartheta_p$	Dtto; $h=d=0,005$ m

[3]

Teplotní součinitel materiálu

Elektrický odpor jako vlastnost materiálů je proměnná veličina. Závisí na různých vlivech. Pro výpočet bude nejdůležitější závislost na teplotě. U kovových vodičů měrný odpor s teplotou roste naopak u polovodičů a izolantů klesá. Měřením bylo zjištěno, že závislost měrného odporu na teplotě lze obecně vyjádřit řadou

$$\varrho = \varrho_R [1 + \alpha_{TS} \cdot \Delta T + \beta_{TS} \cdot (\Delta T)^2 + \gamma_{TS} \cdot (\Delta T)^3 + \dots] \quad (4.29)$$

Pro technickou praxi, kdy je pracovní teplota dostatečně nižší, než teplota tavení daného kovu, stačí zohlednit jen první člen dané řady, tzn. lineární závislost měrného odporu na teplotě.

$$\varrho = \varrho_R (1 + \alpha_{TS} \cdot \Delta T) \quad (4.30)$$

Ve vzorcích značí ϱ_R měrný odpor při zvolené referenční teplotě. V literatuře udávané velikosti měrného odporu se zpravidla vztahují k teplotě +20 °C tomu odpovídá ϱ_{20} . Protože při průtoku proudu je oteplení vodiče nad horní hranici teploty okolí, nemá údaj ϱ_{20} žádný smysl. Z hlediska výpočtu i označení je vhodnější vycházet z hodnot měrného odporu ϱ_0 nebo ϱ_{40} , která odpovídá $T_R = 40$ °C (maximální teplota okolí).

Koeficienty $\alpha_{TS}, \beta_{TS}, \gamma_{TS}$ nazýváme teplotními součiniteli odporu, neboť udávají poměrný přírůstek odporu při zvýšení o 1 K oproti teplotě T_R .

Tab. 4.3 Měrný elektrický odpor a teplotní součinitel pro vybrané materiály

Materiál	$\varrho_0 \cdot 10^{-8} \text{ } (\Omega \cdot \text{m})$	$\alpha_{TS0} \cdot 10^{-3} \text{ } (\text{K}^{-1})$	$\varrho_{40} \cdot 10^{-8} \text{ } (\Omega \cdot \text{m})$	$\alpha_{TS0} \cdot 10^{-3} \text{ } (\text{K}^{-1})$
Cu	1,64	4,3	1,92	3,6
Al	2,7	4,4	3,14	3,8
Ag	1,54	4,5	1,82	3,8
W	4,95	5,6	6,1	4,5

[3]

5. Realizace modelu zhášedla s radiálním magnetickým polem

Základní geometrie zhášedla vychází z běžně dostupné literatury a katalogových materiálů společnosti SIEMENS a ABB. Při tvorbě geometrického modelu kontaktu musíme brát v úvahu použitelnost modelu pro numerické metody a to jak pro simulaci oblouku, tak i pro tepelný výpočet v ustáleném stavu. Proto byl zvolen typ kontaktů radiálním magnetickým polem, kde lze lépe simulovat elektrický oblouk.

Zvolené výchozí parametry zhášedla:

- $U_N = 12 \text{ kV}$
- $I_N = 1000 \text{ A}$
- $I_{KN} = 16 \text{ kA}$
- Zhášení pomocí radiálního magnetického pole (RMF)
- Otevřené provedení. (pouzdro zhášedla je přímo chlazeno okolním vzduchem)

Použité materiály:

- Roubík a hlava pevného kontaktu – elektrovodná měď
- Roubík a hlava pohyblivého kontaktu – elektrovodná měď
- Kontaktní plocha – slinutina CuCr (50/50)
- Vlnovec – titanová ocel
- Vodicí kroužek – ocel
- Vnější izolace – korundová keramika
- Horní a dolní víko – ocel
- Stínítko – měď

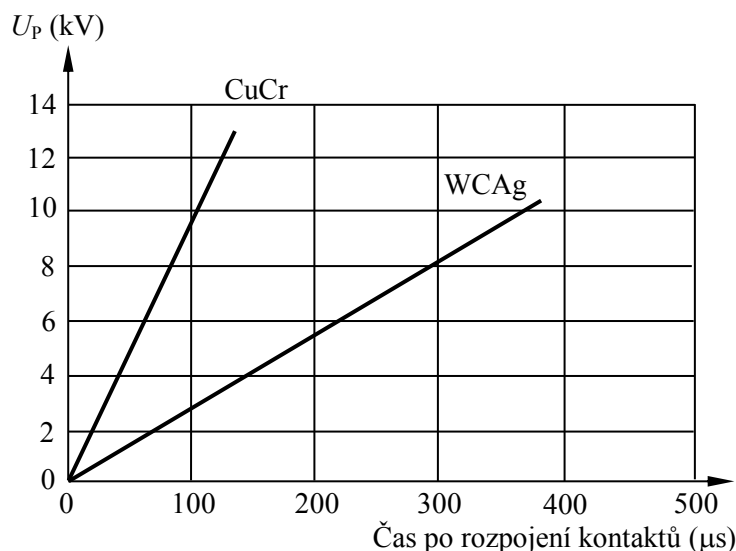
5. 1. Materiály

Důležitou otázkou konstrukce vakuových zhášedel jsou jevy na kontaktech a zejména materiál kontaktů. Na vlastnostech materiálu kontaktů závisí vlastnosti elektrického oblouku a jsou s nimi spojeny jevy při jeho zhášení. Požadavky na materiál kontaktů pro vakuové vypínače jsou velmi přísné. Kontakty musí být vyrobeny z dokonale odplyněného a dezoxidovaného kontaktního materiálu, aby vázání plynů kondenzujícími parami kontaktního kovu při hoření oblouku převažovalo nad uvolňováním plynů z kontaktů a ostatních dílů zhášedla. Množství par vzniklých při vypínání musí mít určitou optimální velikost. Jejich ionizací se vytvoří vodivé médium přenášející proud mezi kontakty. Při jejich nedostatku dochází k utržení proudu před přirozenou nulou, a to velmi prudce. Při vypínání indukčních zátěží se objeví nebezpečné přepětí. Proto i při malých proudech řádu jednotek ampérů, kdy odpařovací energie je malá, musí množství odpařených par být dostatečné pro udržení oblouku. To zajistí materiál s nízkou teplotou varu. Ten však není vhodným kontaktním materiálem. Nejlepší kompromisy byly nalezeny s použitím slinutých materiálů, které jsou vyráběny práškovou metalurgií. Nejpoužívanější jsou:

- WCu pro spínací aplikace a pro ovládání vysokonapěťových kondenzátorů,
- WAg pro stykače,
- CuCr pro vypínače.

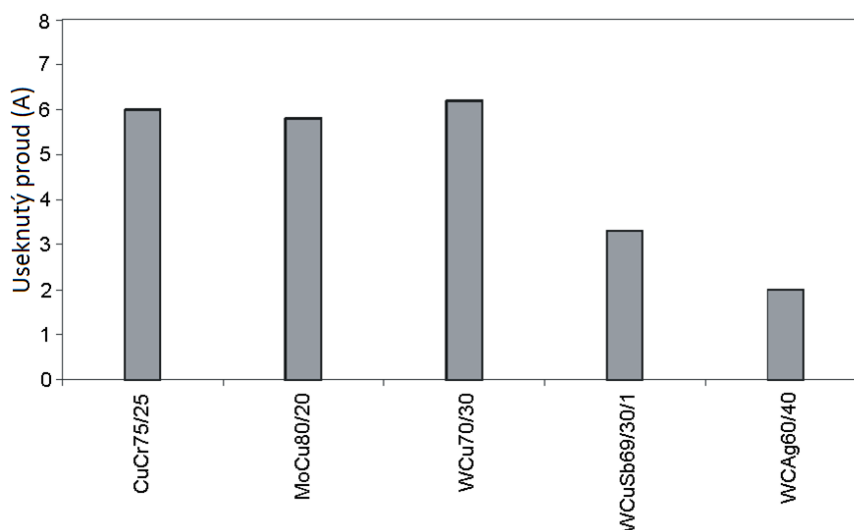
V současné době se jako nejvýhodnější jeví použití CuCr. Spojuje dobré elektrické vlastnosti s vynikající schopností vypínat obvod s výbornou erozí oblouku a dobrou odolností proti svaření. Mezi nevýhody patří o něco vyšší hodnota utrženého proudu než např. u WAg. Procentní obsah Cu se pohybuje v rozmezí 50-80%, zbytek připadá na Cr. [1]

Vyšší hodnota Cu je příznivá pro dobrou elektrickou vodivost a tepelnou vodivost. Naopak vyšší hodnota Cr zajišťuje větší odolnost proti svaření a izolační pevnost při vysokých napětích (obr. 5.1).



Obr. 5.1 Nárůst izolační pevnosti pro různé kontaktní materiály

Na obr. 5.2 je porovnání několika typických kontaktních materiálů. CuCr vykazuje vynikající vypínací schopnost pro všechny hodnoty proudu. Podobně je na tom i MoCu. Z hlediska vypínací schopnosti jsou tyto dva materiály nejlepší. Další neméně důležitou vlastností těchto materiálů je velikost usekávaného proudu před přirozenou nulou.



Obr. 5.2 Velikost useknutého proudu pro různé materiály

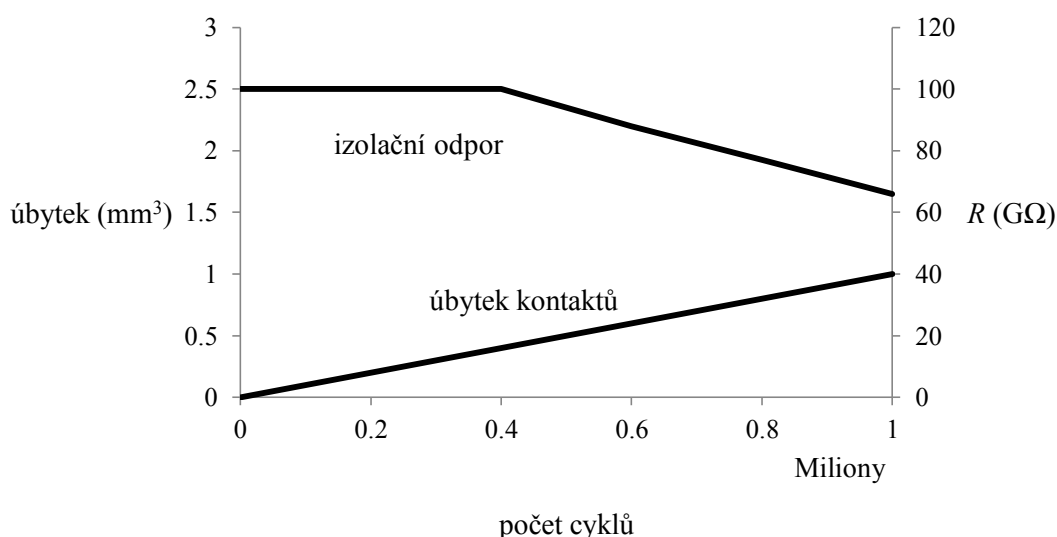
Izolační část může být buď skleněná, nebo keramická. Korundová keramika, která se obvykle používá, je sice dražší než sklo, ale má větší pevnost, lépe se dodržují tolerance a je odolnější vůči nárazům mechanickým i teplotním. Víka jsou kovová. Spojování s kovem se provádí pájením měkkými pájkami pod vakuem při teplotě 800°C. Vlnovec umožňuje pohyb kontaktu a zároveň těsní vnitřní prostor zhášedla proti okolnímu prostředí. Většinou se vyrábí z titanové oceli tloušťky 0,1 až 0,2 mm a určuje mechanickou životnost zhášedla. Ta se pohybuje okolo jednoho miliónu pracovních cyklů.

[1]

5.2. Geometrický model zhášedla (Solidworks)

Kontaktní systém

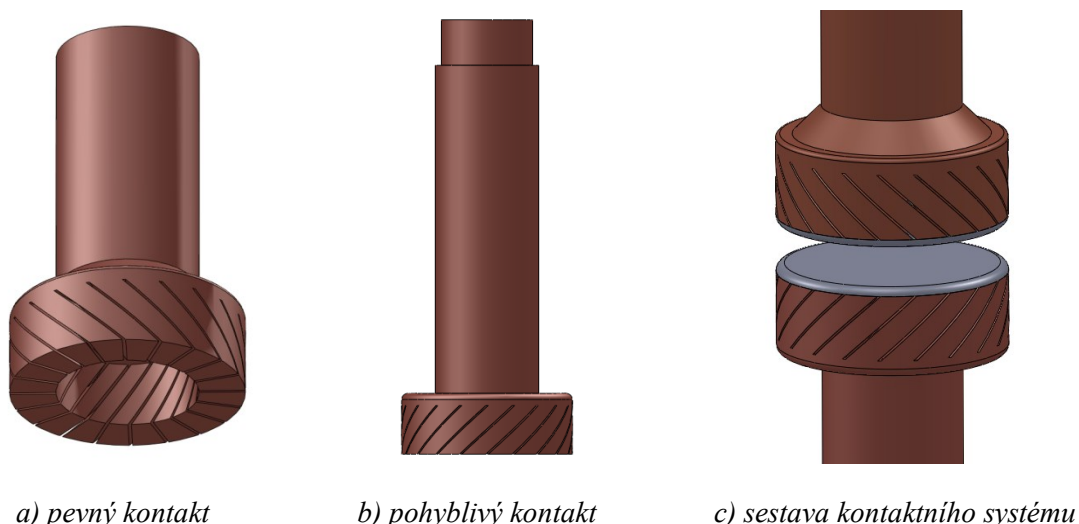
Průrazné napětí je silně závislé na mikroskopickém stavu kontaktů. Stav povrchu způsobuje velký rozptyl hodnot průrazného napětí. Dá se zvětšit formováním zhášedel. To vlastně představuje rovnání povrchových nerovností nebo odstraňování nečistot z povrchu kontaktů elektrickými průrazy. Průrazné napětí vakuových zhášedel vzrůstá s velikostí zdvihu kontaktů. Toto zvětšování průrazného napětí je největší v oblasti malých zdvihů. Naproti tomu mechanická životnost zhášedel, limitovaná vakuovou těsností vlnovce, se s rostoucím zdvihem kontaktů značně zhoršuje. Provozní zdvih je tedy kompromisem mezi těmito závislostmi a je závislý na velikosti jmenovitého napětí a na druhu přístroje. Tak např. u stykačů do 7,2 kV je zdvih přibližně 2-4 mm, u vypínačů na 12 kV je 8-12 mm. Při vypínání proudů dochází k vypařování kontaktního materiálu, a tím i k zmenšování kontaktů. Snižováním výšky kontaktů se zvětšuje vypínací vzdálenost, a tím také namáhání vlnovce. Změna elektrických vlastností zhášedla během jeho životnosti při vypínání provozních proudů je na obr. 5.3.



Obr. 5.3 Elektrické vlastnosti vakuového zhášedla

Základní rozměry byly vypočteny pro záměrně nízkou proudovou hustotu $J = 1 \text{ A/mm}^2$ z důvodu špatného chlazení. U stykových ploch byla tato hodnota volena dokonce poloviční, opět kvůli špatnému chlazení a zároveň vyšší rezistivitě slinutých materiálů oproti čisté mědi. Slinutý kontaktní materiál se používá pouze v podobě disků připevněných na hlavu kontaktu a to díky vysokým výrobním nákladům. Pohyblivý kontakt je rozměrově delší z důvodu uchycení pohonného mechanismu a utěsnění pouzdra pomocí vlnovce. Hlava kontaktu má miskový charakter. To představuje pro procházející proud první pravoúhlý záhyb. Ten vytvoří elektromagnetické pole, které oblouk vytlačí na okraj kontaktu. Počet zářezů volíme vhodně, vzhledem k mechanické pevnosti a správné funkci zhášedla. Největší význam má úhel sklonu těchto zářezů, které tvoří druhý pravoúhlý záhyb. Tímto sklonem je určena vypínací rychlost oblouku. Správný sklon nelze předem přesně odhadnout. Zjistíme jej až řešením numerické analýzy. Izolační vzdálenosti jsou dány dielektrickou pevností vakua. Kontaktní zdvih byl zjištěn dle literatury [1]. Pro jmenovité napětí 12 kV se volí výška zdvihu dle zhášecí špičky 8 - 12 mm. [1,2]

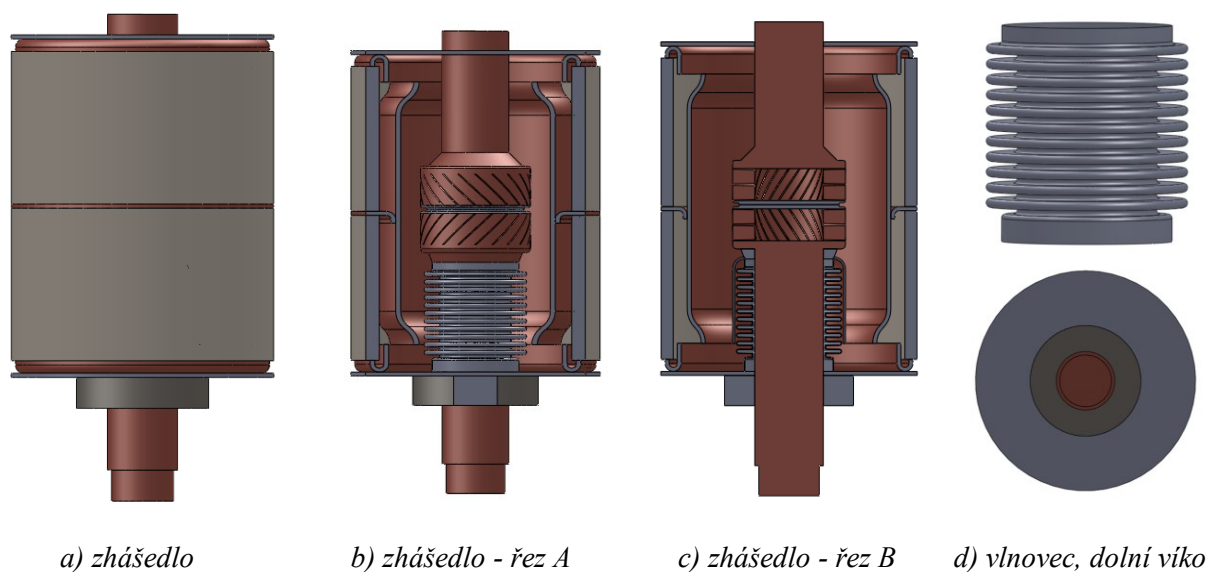
Navrhovaná izolační vzdálenost je průměrem tedy 10 mm. Geometrický model byl vytvořen ve školní verzi programu Solidworks, stejně jako hrubá technická dokumentace kontaktního systému. Ta je uvedena v příloze 11 až 14.



Obr. 5.4 Geometrický návrh kontaktního systému

Pouzdro zhášedla

Rozměry pouzdra byly odvozeny od rozměrů kontaktního systému. Nejprve byl navržen vlnovec (obr. 5.5 d). Jeho tloušťka je pouze 0,2 mm což zajišťuje nízký zdvih a snadný pohyb kontaktu. Dále bylo zakresleno stínítko, kde musí být dodrženy izolační vzdálenosti mezi jeho povrchem, kontakty a vlnovcem. Tato vzdálenost odpovídá kontaktnímu zdvihu. Stínítko je armováním přichyceno k vnější keramické izolaci. Celé pouzdro je uzavřeno pomocí horního a dolního kovového víka. Zde je těsnost a mechanická soudržnost zajištěna pomocí měkké pájky. Kontakty byly do sestavy zhášedla vloženy tak aby místo kontaktního styku bylo uprostřed pouzdra. Pohyblivý kontakt obepíná ocelový vodící kroužek, který zajišťuje souosost kontaktů.

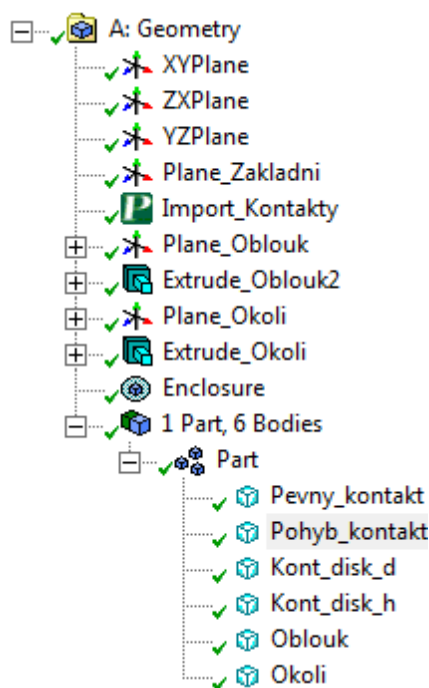


Obr. 5.5 Geometrický návrh vakuového zhášedla

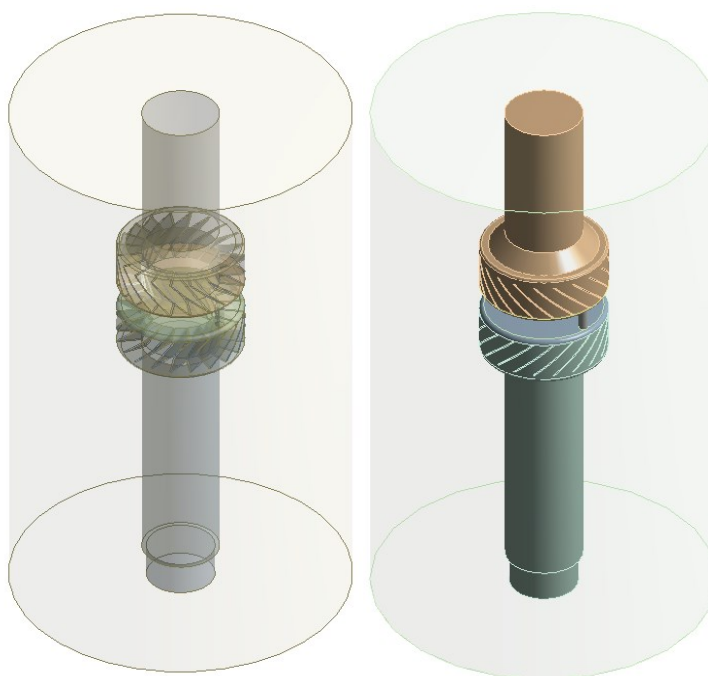
6. Elektromagnetický model vakuového zhášedla s RMF

6.1. Sestavení numerického modelu (ANSYS - Workbench)

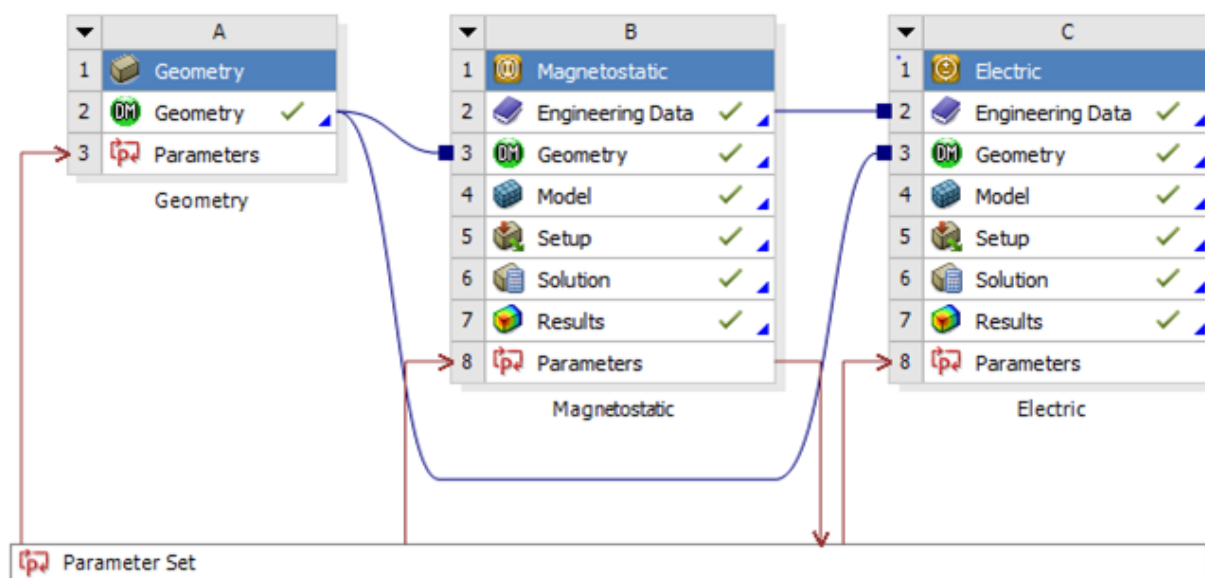
Pro řešení silových účinků na elektrický oblouk je využit zjednodušený model, který představují pevný a pohyblivý kontakt, kontaktní disky a elektrický oblouk. Protože ve zhášedle s radiálním magnetickým polem vzniká při vypínání zkratového proudu oblouk v koncentrované podobě, můžeme v prvním přiblížení pro jeho model využít podobnosti s vodičem kruhového průřezu. V první fázi sestavení začneme editací geometrického modulu. Přitom je využit 3D model, který je již vytvořen v kreslicím programu *Solidworks*, a provedeme jeho import do vlastního souřadného systému, přičemž je dbáno na to, aby nedošlo ke spojení jednotlivých prvků. To je zajištěno funkcí *Add frozen*. Pro možnost automatické změny polohy oblouku, je jeho geometrický model vytvořen až po úspěšném importu. To je provedeno vložení objemu ve tvaru válce mezi kontakty. Válec je malého průměru (řádově jednotky mm). Z důvodu správného silového působení na oblouk musí být jeho průměr mnohem menší, než průměr kontaktů. Válec je nakreslen do samostatného, souřadného systému, abychom jim mohli pohybovat, zatímco zbytek sestavy bude statický. Souřadný systém (*Plane_Oblouk*) leží na povrchu kontaktního disku a umožňuje rotaci kolem svislé osy z . Polohu oblouku nastavíme pomocí úhlu ψ , který bude představovat jeden ze vstupních parametrů. Celý kontaktní systém uzavřeme do objemu tvaru válce, který představuje vakuové okolí. Zde dbáme na to, aby podstavy válce a místa vstupu resp. výstupu proudu byly v jedné rovině. Průměr válce je volen jako kompromis mezi podmínkou paralelního magnetického toku (velký průměr) a náročností na výpočet (malý průměr). Pro spojení jednotlivých dílů a vytvoření okolí použijeme příkaz *Enclosure*, čímž je editace geometrického modulu ukončena.



Obr. 6.1 Úprava geometrického modulu



Obr. 6.2 Import 3D modelu

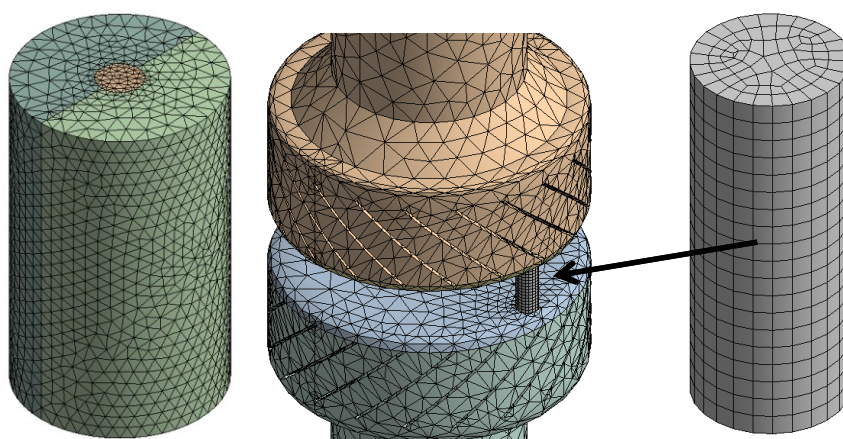


Obr. 6.3 Schéma analýzy

Geometrický modul je spojen s elektromagnetickým modulem *Magnetostatic* a *Electric* jak je patrné z obr. 6.3. Program automaticky vytvoří modul pro nastavení parametrů (*Parameter set*). V modulu *Magnetostatic* v části *Engineering Data* nejprve nastavíme potřebné vlastnosti použitých materiálů jako je např. rezistivita a *BH* charakteristika. Definované materiály jsou uvedeny v tab. 6.1.

Tab. 6.1 Parametry použitých materiálů

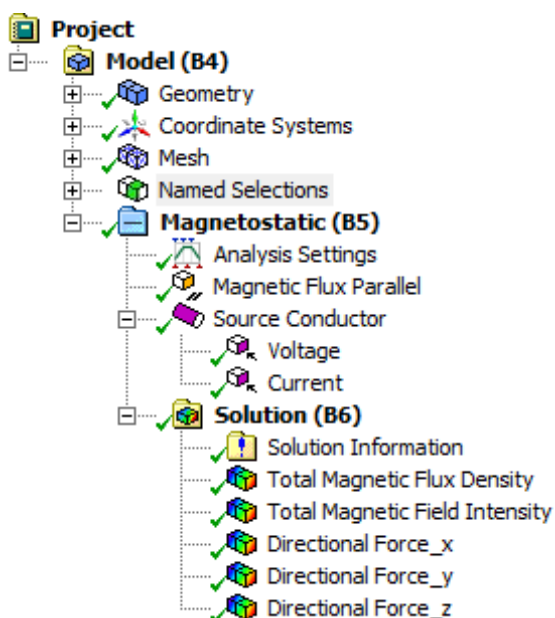
Materiál	μ_R (-)	ρ ($\Omega \cdot m$)
Měď	1	$1,694 \cdot 10^{-8}$
CuCr (50/50)	1	$3 \cdot 10^{-8}$
Elektrický oblouk (plazma)	1	je funkcí proudu
Vakuum (10^{-5} Pa)	1	$2 \cdot 10^{17}$



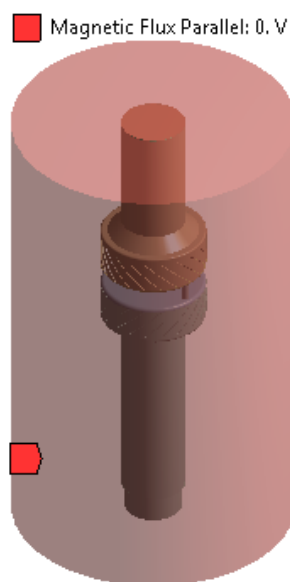
Obr. 6.4 Pokrytí modelu výpočetní sítí

Nyní spustíme *ANSYS Mechanical* z modulu *Magnetostatic* (obr. 6.3) a přiřadíme materiály k jednotlivým objemovým prvkům vakuového zhašedla. Při pokrývání modelu sítí věnujeme zvýšenou pozornost prostoru mezi kontakty, kontaktním plochám a oblouku (obr. 6.4). Zde bylo potřeba natvrdo navýšit počet prvků mocí funkce *sizing*.

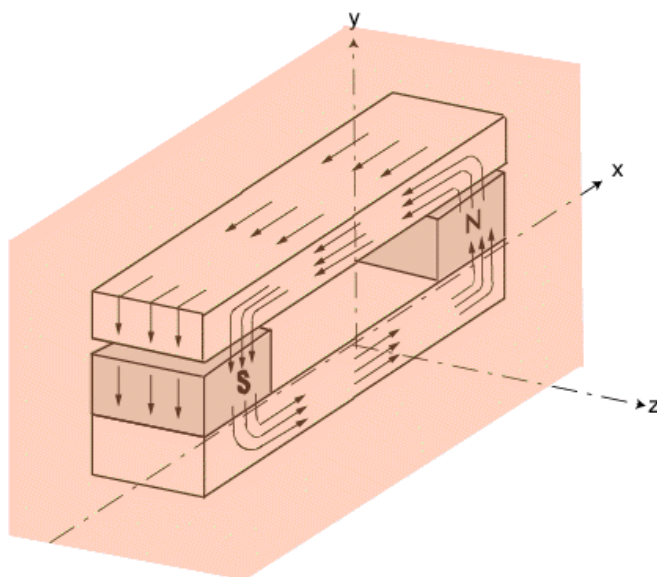
Tato funkce ovlivňuje počet prvků na hraně, ploše nebo dokonce v objemu použitého modelu, a lze tak nastavit v různých místech různou hustotu sítě. Typ sítě je volen s preferencí 75% pro elektromagnetismus. Jedná se o velmi důležitou část nastavení, protože správné vysítování zásadním způsobem ovlivňuje správnost, přesnost a délku výpočtu. Přičemž platí, čím jemnější síť, tím přesnější výpočet. Pak se ale značně prodlužuje doba výpočtu, proto je nutné volit určitý kompromis. Síť se skládá z konečného množství prvků a uzlů, přičemž v každém uzlu je jedno výpočetní místo (odtud název metody konečných prvků, neboli numerické metody). V části *Named Selections* je možno snadno vybírat různé skupiny jednotlivých dílů z celého modelu. Pro nízký počet dílů tato funkce nebyla použita. Na plochy tvořené vakuovým okolím přidáme podmínku *magnetic flux parallel* – rovnoběžnost magnetických siločar s hranicí vzduchového okolí (Obr. 6.6). Okolí se volí přibližně 10x větší, než je největší rozměr modelu, z důvodu prodloužení doby výpočtu a nízké chyby je výsledné okolí podstatně menší.



Obr. 6.5 Úpravy v elektrotepelném modulu



Obr. 6.6 a) Aplikace paralelního magnetického toku

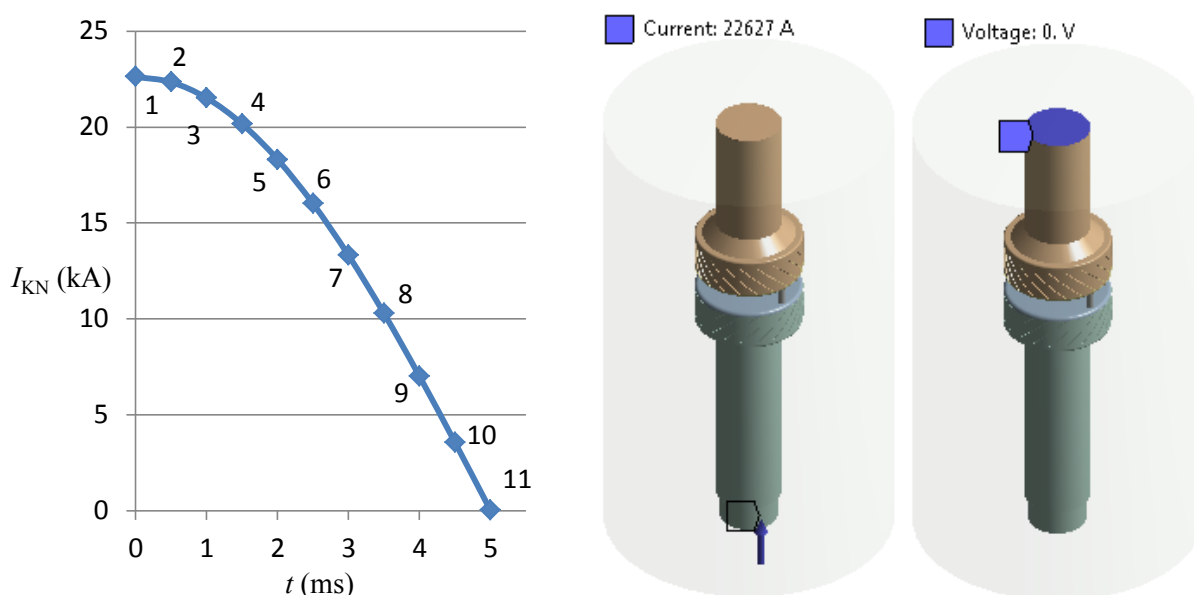


Obr. 6.6 b) Příklad rovnoběžnosti siločar magnetického toku s plochami okolí

V části *source conductor* je vybrána vodivá část, která je zdrojem elektromagnetického pole, tuto část představuje celý kontaktní systém včetně elektrického oblouku. Na jednu z vodivých hraničních ploch modelu navolíme velikost proudu pomocí funkce *Current* a na druhou nulový potenciál pomocí funkce *Voltage* jak je patrné z obr. 6.7. Místo nastavení konkrétní hodnoty proudu jej nastavíme jako další vstupní parametr, program jej automaticky zahrne mezi další proměnné parametry. Průběh vypínaného zkratového proudu představuje jedna půlperioada. Během této půlperioady musí dojít k bezpečnému uhašení oblouku a obnovení dielektrické pevnosti. Simulované zhášení nastává až po úplném oddálení kontaktů. Tento okamžik byl zvolen v nejnepříznivějším případě, tedy právě v maximální hodnotě proudu.

$$i = I_M \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad I_M = 22,6 \text{ kA} \quad (I_{KN} = 16 \text{ kA}) \quad (6.1)$$

Protože se jedná pouze o statickou analýzu, je proud rozdělen na určitý počet vzorků (11) přičemž každému vzorku bude odpovídat jeden celý výpočetní cyklus, ten je podrobněji rozebrán dále.



Obr. 6.7 Průběh vypínaného proudu a jeho aplikace na kontaktní systém

Editace modulu *electric* byla obdobná jako u předchozího modulu a slouží pouze ke grafickému zobrazení vektorů proudové hustoty v elektrickém oblouku (obr. 6.10)

6.2. Řešení modelu

Pro stanovení aktuální polohy oblouku pomocí dráhy nebo úhlu je potřeba znát jeho aktuální hmotnost a velikost síly, která na něj působí, jak je patrné z pohybových rovnic.

$$a_{Tn} = \frac{F_{Tn}}{m_n}$$

$$v_n = \int a_{Tn} \cdot dt = a_{Tn} \cdot \Delta t + v_{n-1}$$

$$s_n = \int (a_{Tn} \cdot \Delta t + v_{n-1}) \cdot dt = \frac{1}{2} \cdot a_T \cdot \Delta t^2 + v_{n-1} \cdot \Delta t + s_{n-1} \quad (6.2)$$

Hmotnost elektrického oblouku není konstantní a je závislá na době hoření oblouku, velikosti vypínaného proudu a kontaktním materiálu.

Tato závislost je zjištěna pro použitý typ kontaktních disků z obr. 2.5, ze kterého, je úbytek materiálu vypařením stanoven na hodnotu $0,51 \text{ cm}^3 \cdot \text{kA}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$m = \iint 0,51 \cdot \rho_{\text{CuCr}} \cdot di \cdot dt \quad (6.3)$$

Příklad výpočtu pro první řádek tabulky pro kontaktní materiál CuCr v poměru 50/50.

$$\rho_{\text{CuCr}} = \frac{\rho_{\text{Cu}} + \rho_{\text{Cr}}}{2} = \frac{8960 + 7150}{2} = 8055 \text{ kg} \cdot \text{m}^3 \quad (6.4)$$

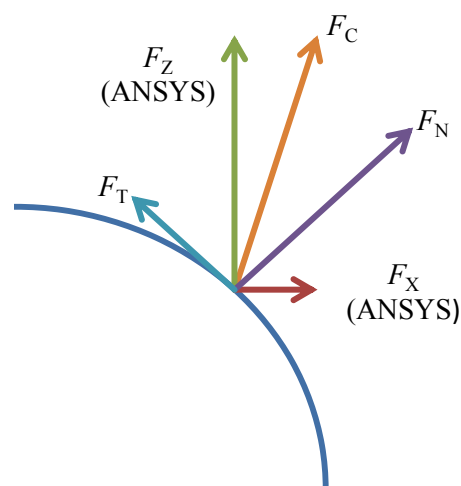
$$\Delta m_0 = 0,51 \cdot 8055 \cdot 10^{-6} \cdot 22,6 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 46,5 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \quad (6.5)$$

Počáteční hmotnost ($m_0 = 6,6 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$) byla vypočtena z času působení oblouku během oddálení kontaktů tedy během jedné půlperiody proudu.

$$m_0 = 0,51 \cdot 8055 \cdot 10^{-6} \cdot 16 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 657 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \quad (6.6)$$

Tab. 6.2 Množství odpařeného materiálu po oddálení kontaktů

krok	t (ms)	I (kA)	Δm (μg)	m (μg)
0	0	22,6	46,5	657
1	0,5	22,3	45,8	703
2	1	21,5	44,2	748
3	1,5	20,2	41,5	791
4	2	18,3	37,6	831
5	2,5	16,1	33,1	866
6	3	13,3	27,3	896
7	3,5	10,3	21,2	921
8	4	7,01	14,4	938
9	4,5	3,56	7,31	949
10	5	0,02	0,04	953



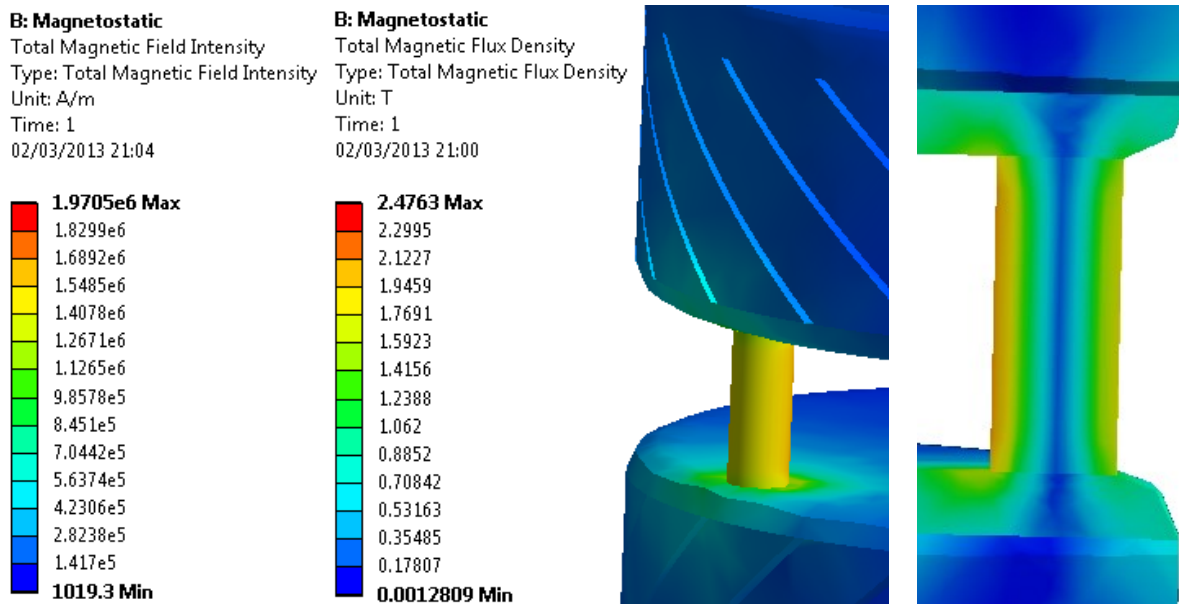
Obr. 6.8 Vektorové zobrazení sil

Jako výstup řešení numerického modelu nás bude zajímat celková indukce a intenzita magnetického pole, proudová hustota a hlavně pak síly působící na objem oblouku v axiálním směru tedy F_X a F_Z . Z těchto sil vypočteme celkovou sílu působící na oblouk F_C a tu opět rozložíme na sílu tečnou F_T a odstředivou F_N , které jsou pro výpočet podstatné.

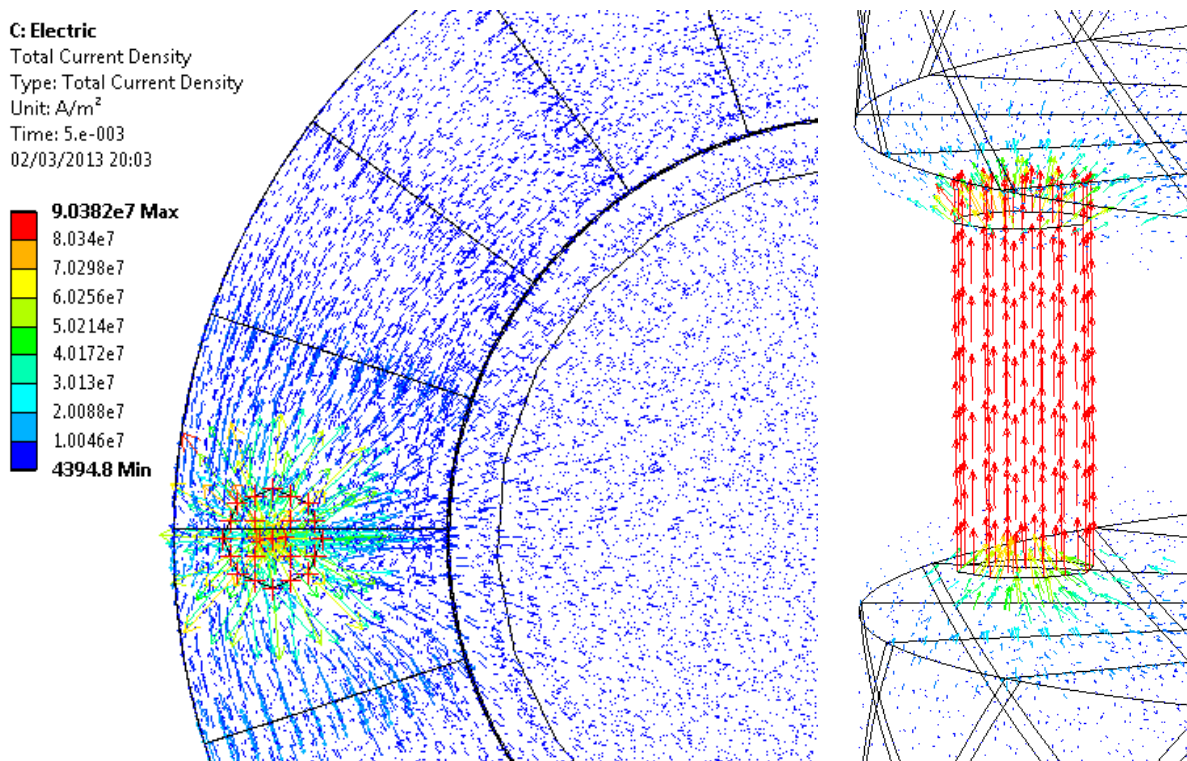
Z vypočtené hmotnosti kovových par m a tečné síly F_T vypočteme výsledné zrychlení pohybu oblouku. Integrací zrychlení dostaneme okamžitou rychlost oblouku a další integrací ураženou vzdálenost oblouku po povrchu kontaktu. Vzdálenost oblouku po prvním výpočetním kroku bude odpovídat početní poloze oblouku pro druhý výpočetní krok. Tento proces bude opakován pro všechny následující kroky. Sklon zářezů kontaktů se volí tak, aby vypínací rychlost oblouku byla 70-150 m/s a oblouk oběhl po kontaktech zhruba 1,5x, tato informace byla zjištěna z katalogů společnosti SIEMENS. Proto bylo zpočátku nutné výpočet několikrát opakovat. Taktéž se výpočet 11x opakoval pro jednotlivé kroky, kterým náleží různá hodnota proudu a odlišná poloha. Počet opakování byl zvolen s ohledem na přesnost výpočtu a velkou časovou náročnost.

6.3. Vyhodnocení modelu

Výsledky jednotlivých analýz odpovídají prvnímu výpočtovému kroku (maximum proudu) na obr. 6.9 je vidět řešení magnetostatického modelu. Rozložení intenzity a indukce elektromagnetického pole je stejná – liší se jen absolutní velikostí. Je to způsobeno tím, že diamagnetický materiál kontaktů i plazma tvořící oblouk mají lineární BH charakteristiku. Podle předpokladu je hodnota magnetické indukce největší v okolí hoření oblouku a dosahuje velikosti 2,5 T a proto je v tomto místě i největší silové působení.



Obr. 6.9 Rozložení elektromagnetické intenzity a indukce



Obr. 6.10 Vektory proudové hustoty

Silové účinky (obr. 6.9) uvádějící oblouk do pohybu vznikají interakcí proudu procházejícího obloukem a magnetického pole, které je buzené proudem tekoucím proudovodnou dráhou. Tato dráha je tvořena několika pravoúhlými záhyby, které vytvoří požadované magnetické pole. K zobrazení proudové hustoty bylo použito elektrického modelu (obr. 6.10). Zde je vidět, jak jednotlivé vektory proudu směřují z masivního tělesa kontaktu do malého prostoru na stykové ploše kontaktů. Odtud pak postupují do tělesa oblouku. Ten je z hlediska proudové hustoty zatížen nejvíce, protože se jedná o místo s nejmenším průřezem a velikost proudu je oblouku vnucena vnějším obvodem.

Tab. 6.3 Vypočtené hodnoty na základě výstupních parametrů z řešení numerického modelu (Pro tučně zvýrazněné hodnoty je níže uveden výpočet 6.7 až 6.14)

Vstupní parametry (ANSYS)			Výstupní parametry (ANSYS)		Vypočtené hodnoty (EXCEL)					
krok	ψ (°)	I (kA)	F_X (N)	F_Z (N)	F_C (N)	F_N (N)	F_T (N)	a_T (m·s ⁻²)	v (m/s)	s (mm)
0	0	22,6	35,3	-18,7	39,9	35,3	18,7	32 980	0	0
1	15	22,3	31,5	-24,0	39,6	34,99	18,6	30560	16,5	4,12
2	43	21,5	16,0	-31,9	35,6	31,50	16,7	25856	31,8	16,2
3	83	20,2	-8,0	-31,0	32,0	28,30	15,1	21969	44,7	35,3
4	133	18,3	-25,5	-9,1	27,1	23,92	12,7	17691	55,7	60,4
5	191	16,1	-13,3	14,3	19,5	17,25	9,14	12238	64,5	90,5
6	254	13,3	7,21	12,2	14,2	12,54	6,64	8593	70,7	124
7	321	10,3	7,51	-3,51	8,29	7,33	3,88	4890	74,9	161
8	391	7,01	-1,09	-3,76	3,91	3,46	1,83	2264	77,4	199
9	462	3,56	-0,94	0,20	0,962	0,85	0,45	550	78,5	238
10	533	0,02	0	0	0	0	0	0	78,8	277

Příklad výpočtu pro první výpočetní krok v tabulce:

Pro výpočet požadovaných sil je použito goniometrických vzorců.

Výpočet celkové síly působící na oblouk:

$$F_{C0} = \sqrt{F_{X0}^2 + F_{Z0}^2} = \sqrt{35,27^2 + (-18,7)^2} = 39,9 \text{ N} \quad (6.7)$$

Výpočet součinitelů pro přepočet celkové síly na tečnou a normálovou sílu:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{F_X}{F_C}\right) = \left(\frac{35,26}{39,9}\right) = 27,91^\circ \quad (6.8)$$

$$k_N = \cos(\varphi) = 0,884 \quad (6.9)$$

$$k_T = \sin(\varphi) = 0,468 \quad (6.10)$$

$$F_{N0} = F_{C0} \cdot k_N = 39,9 \cdot 0,884 = 35,3 \text{ N} \quad (6.11)$$

$$F_{T0} = F_{C0} \cdot k_T = 39,9 \cdot 0,468 = 18,7 \text{ N} \quad (6.12)$$

Součinitelé k_N a k_T nezávisí na velikosti proudu, protože jsou určeny poměrem mezi odstředivou a tečnou silou a ten je pevně určen konstrukčními parametry zhášedla. Pro další kroky (řádky tabulky) byly požadované síly vypočteny pomocí výše uvedených činitelů (6.9,6.10)

Výpočet uražené dráhy oblouku po povrchu kontaktu a přepočet na úhlovou dráhu neboli úhel, o který se oblouk otočí v cylindrickém souřadném systému. Pro dobu jednoho kroku $0,5 \text{ ms}$ a délku jednoho oběhu oblouku po kontaktu $O = 163 \text{ mm}$.

$$a_{T0} = \frac{F_{T0}}{m_0} = \frac{18,7}{567 \cdot 10^{-6}} = 32\,980 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Vycházíme z počáteční podmínky, kdy se oblouk v $t_0 = 0$ pohybuje nulovou rychlostí a neurazil žádnou vzdálenost ($v_0 = 0, s_0 = 0$).

(6.13)

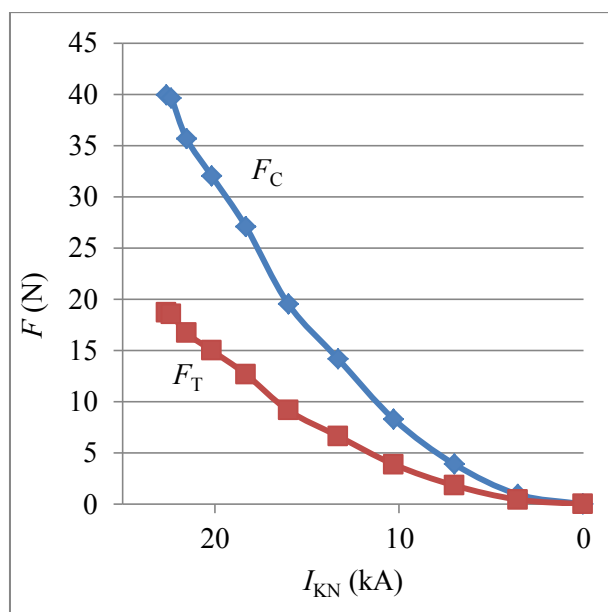
$$v_1 = a_{T0} \cdot \Delta t + s_0 = 32980 \cdot 5 \cdot 10^{-4} + 0 = 16,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$s_1 = \frac{1}{2} \cdot a_{T1} \cdot \Delta t^2 + v_0 \cdot \Delta t + s_0 = \frac{1}{2} \cdot 32980 \cdot (5 \cdot 10^{-4})^2 + 0 \cdot 5 \cdot 10^{-4} + 0 = 4,12 \text{ mm}$$

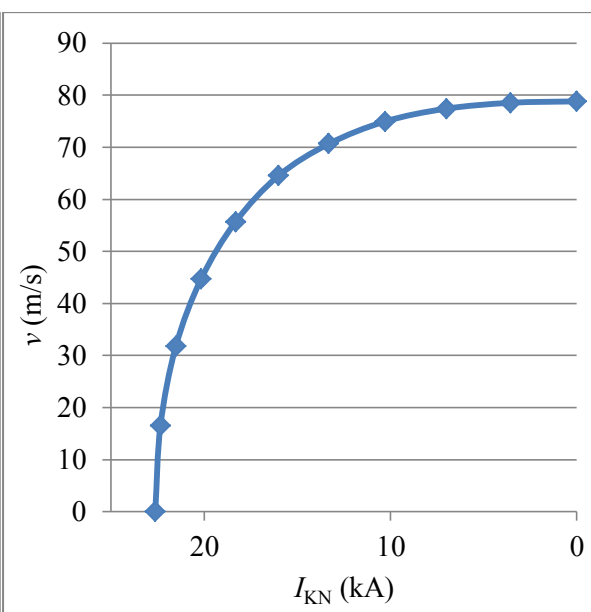
Uražená vzdálenost oblouku po prvním kroku tvoří novou výchozí polohu oblouku:

$$\psi_1 = \frac{s_1 \cdot 360}{O} = \frac{4,12 \cdot 360}{163} = 9,1^\circ$$

(6.14)



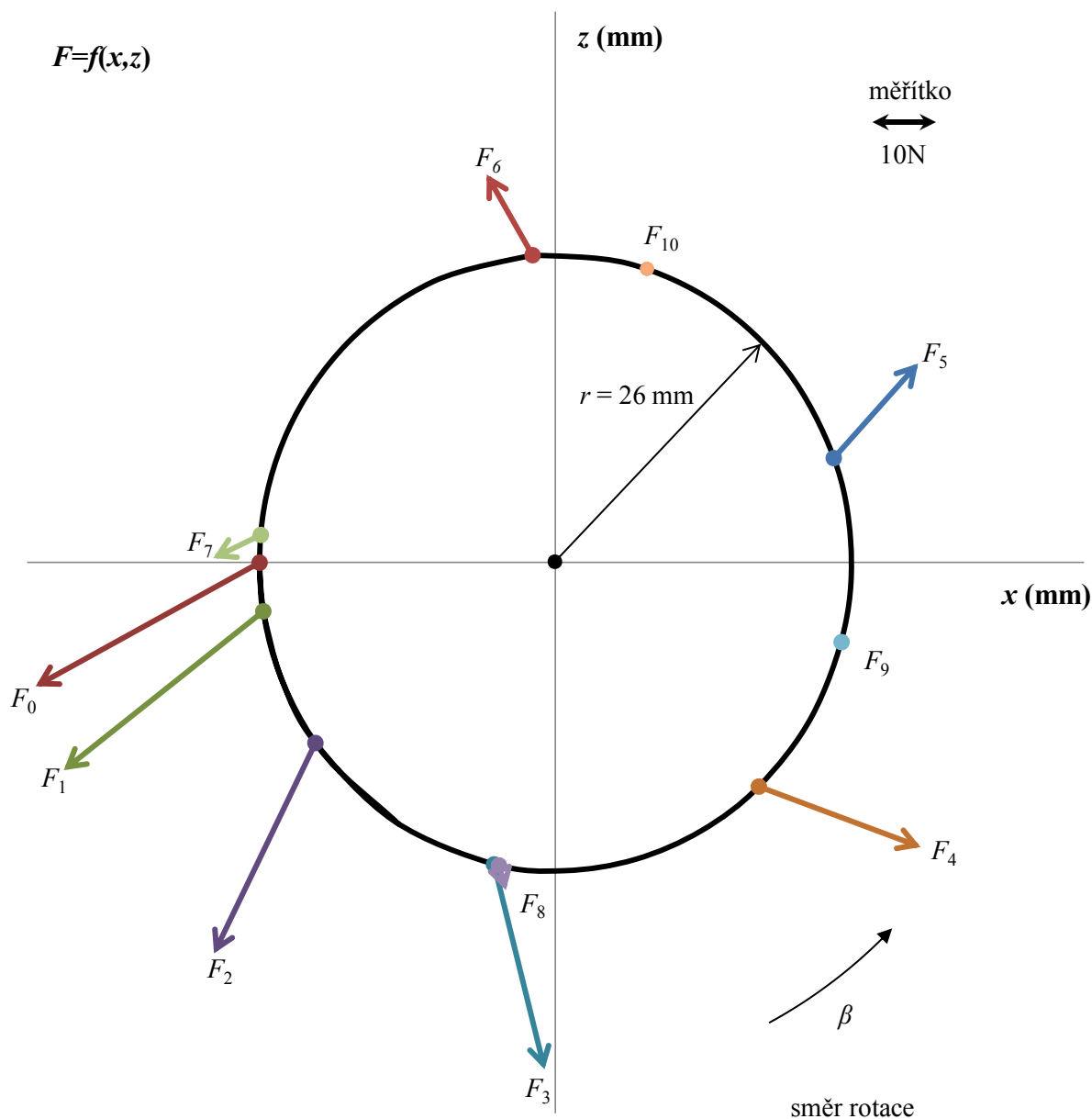
Obr. 6.11 Celková a tečná složka síly působící na těleso oblouku



Obr. 6.12 Rychlost oblouku po povrchu kontaktu

Numericky vypočtené sumy sil působící na oblouk byly importovány do tabulkového procesoru k dalšímu zpracování. Z obr. 6.11, jsou vidět průběhy sil v závislosti na klesajícím proudu, ten odpovídá teoretickému předpokladu, kdy síla je přímo úměrná kvadrátu proudu. Obdobný tvar bude také mít i závislost zrychlení na proudu. Velikost zrychlení sice rychle klesá, ale stále má kladnou hodnotu, proto rychlost pohybu oblouku po kontaktu (obr. 6.12) stále roste, až na maximální hodnotu 79 m/s , která je obdobná jako u skutečných zhášedel ($70\text{--}150\text{ m/s}$). Na obr. 6.13, je zobrazen černý kruh, který představuje okraj opalovacího kontaktu u zhášedla po kterém předpokládáme pohyb oblouku. Z kruhu vycházejí vektory sil působící na oblouk. Číslo síly odpovídá číslu kroku výpočtu. Šipka označuje směr působení celkové síly a kulatý bod na druhém konci vektoru určuje aktuální polohu oblouku. Z obrázku je také dobře patrný pohyb oblouku po kontaktu, postupně klesající síly a stejný úhel vektoru vůči tečně oblouku.

Z toho vyplývá, že poměr odstředivé a tečné síly je konstantní a oblouk je stejným poměrem těchto sil urychlován a zároveň udržován na okraji kontaktu. Rozestupy mezi jednotlivými vektory sil se zvětšují, i když zůstává zachována délka jednoho výpočetního kroku. To je způsobeno zrychleným pohybem oblouku. Během vypínání oblouk oběhne okolo kontaktu 1,7x to je obdobná hodnota jaké dosahují reálná zhášedla. Například výrobce SIEMENS uvádí jako průměrnou hodnotu 1,5 oběhu oblouku po kontaktu. Ke konci doby hoření oblouku jeho rychlost stoupá už jen minimálně, příčinou jsou velmi malé síly, které na něj působí např. F_{10} , F_{11} patrné z obr. 6.13. Důvodem je rychle klesající zkratový proud, v jehož nule oblouk uhasíná a zhášedlo úspěšně vypíná.

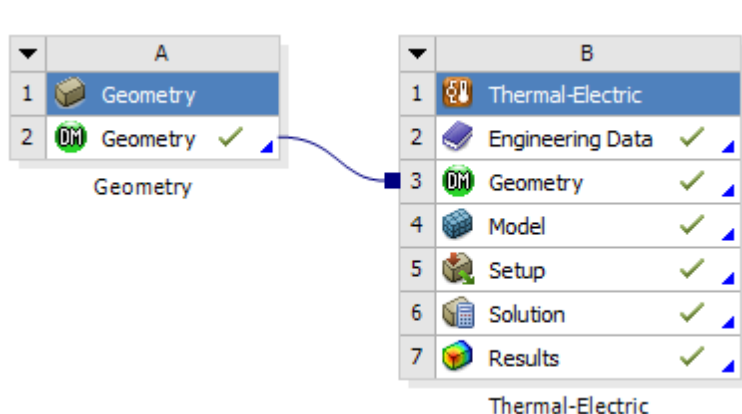


Obr. 6.13 Radiální síly působící na rotující oblouk po povrchu kontaktu

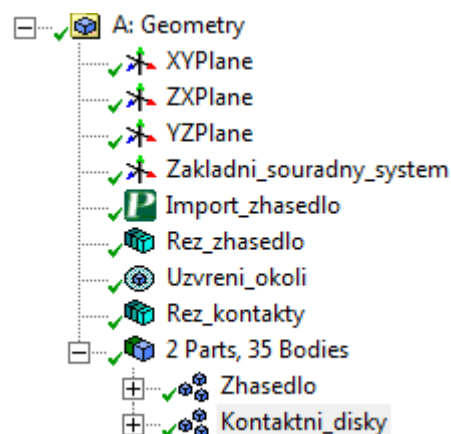
7. Elektrotepelný model vakuového zhášedla s RMF v ustáleném stavu

7.1. Sestavení numerického modelu (ANSYS – Workbench)

Zvláštní pozornost v konstrukci vakuového zhášedla je nutné věnovat tepelným poměrům při průchodu jmenovitého proudu. Jelikož je vakuum dobrým tepelným izolantem, probíhá chlazení proudovodných částí pouze v axiálním směru vedení tepla prostřednictvím přívodů. Je proto nutné přívody ke kontaktům konstruovat tak, aby byly zajištěny žádoucí tepelné poměry uvnitř zhášedla. Pro řešení oteplení vakuového zhášedla byl použit 3D model s větším počtem detailu, oproti výpočtu pomocí tepelné sítě kde je použit model zjednodušený. V první fázi sestavení využijeme geometrického modelu, který je již vytvořen v kreslicím programu Solidworks, a provedeme import do vlastního souřadného systému, přičemž dbáme na to, aby nedošlo ke spojení jednotlivých prvků. To je zajištěno funkcí *Add frozen*. Pro lepší vysíťování a tudíž i vyšší rychlost a přesnost výpočtu byl model pomocí funkce *Slice* rozdělen na více částí. K vytvoření vakuového prostoru uvnitř zhášedla bylo využito příkazu *Enclosure*. Zhášedlo bylo v místě styku (kontaktních disků) rozděleno na dvě části (2 *Parts* obr. 7.2), aby bylo možno simulovat elektrický a tepelný stykový odpor.



Obr. 7.1 Schéma analýzy



Obr. 7.2 Úpravy v geometrickém modulu

Geometrický modul je spojen s elektro-tepelným modulem jak je patrné z obr. 7.1. Následovně začíná editace termoelektrického modulu. Zde v části *Engineering Data* jsou nejprve nastaveny potřebné vlastnosti použitých materiálů jako je např. tepelná a elektrická vodivost (či rezistivita) a jejich tepelná závislost. Definované materiály jsou uvedeny v tab. 7.1.

Tab. 7.1 Oteplení jednotlivých prvků

Materiál	λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)
Měď	401	$1,694 \cdot 10^{-8}$
CuCr (50/50)	160	$3 \cdot 10^{-8}$
Ocel	45	$1 \cdot 10^{-6}$
Elektrotechnický porcelán	1,5	$1 \cdot 10^{12}$
Vakuum (10^{-5} Pa)	0,00137	$2 \cdot 10^{17}$

Nyní spustíme *ANSYS Mechanical* a přiřadíme materiály k jednotlivým objemovým prvkům vakuového zhášedla. Dále je třeba nastavit stykový odpor. V části *Connections* se vytvoří všechny místa, které nebyly dokonale spojeny v geometrickém modulu. V místech, kde neuvažujeme stykový odpor, nastavíme velmi vysokou hodnotu plošné vodivosti, v těchto místech pak nebudou vznikat žádné přídavné tepelné ztráty.

V místě styku kontaktních disků nastavíme převrácenou hodnotu stykového elektrického i tepelného odporu přepočtenou na velikost plochy místa styku. Stykový odpor zjistíme výpočtem dle typů kontaktů a velikostí přítláčné síly. Tato síla byla zvolena $F = 300\text{N}$

$$R_S = k \cdot F^{-n} = 6 \cdot 10^{-4} \cdot 300^{-1} = 2 \mu\Omega \quad (7.1)$$

Obdobným způsobem byl vypočten tepelný odpor místa styku:

$$R_{TS} = \frac{k}{\rho \cdot \lambda \cdot F^n} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{2,02 \cdot 10^{-8} \cdot 401 \cdot 300^1} = 0,247 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (7.2)$$

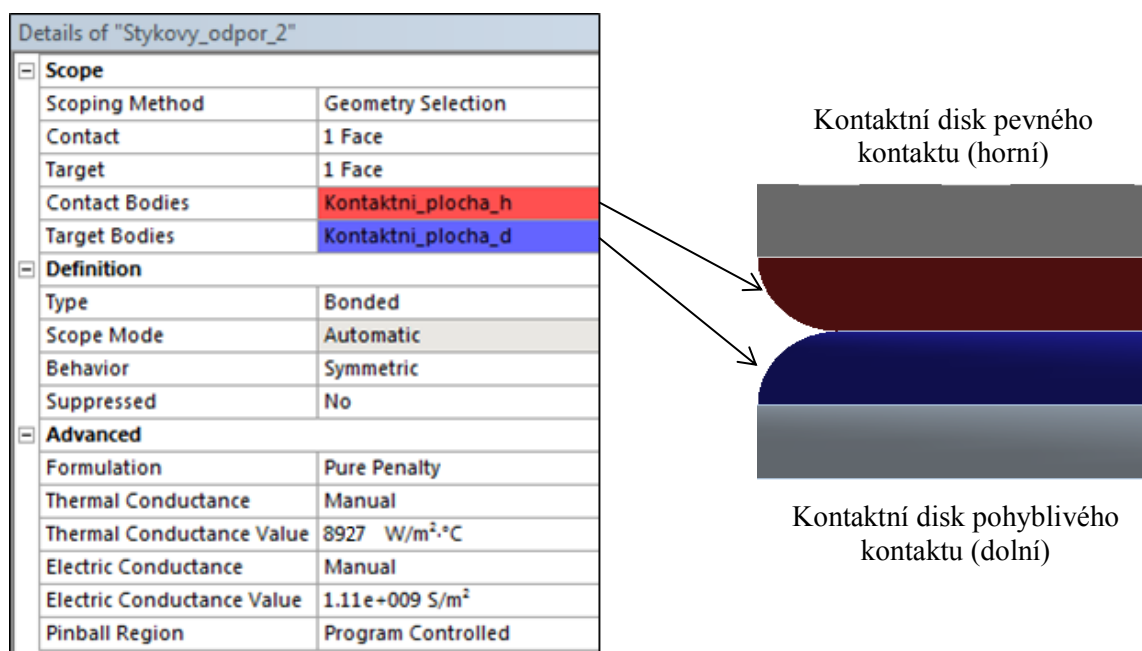
k – materiálová konstanta pro čisté měděné kontakty $k = 6 \cdot 10^{-4}$

n – určuje druh styku, pro plošný styk $n = 1$

Stykový kontaktní disk je rozdělen na 2 části, proto se v ANSYSu vygenerovaly i 2 stykové plochy, pro které, byly zadány shodné parametry.

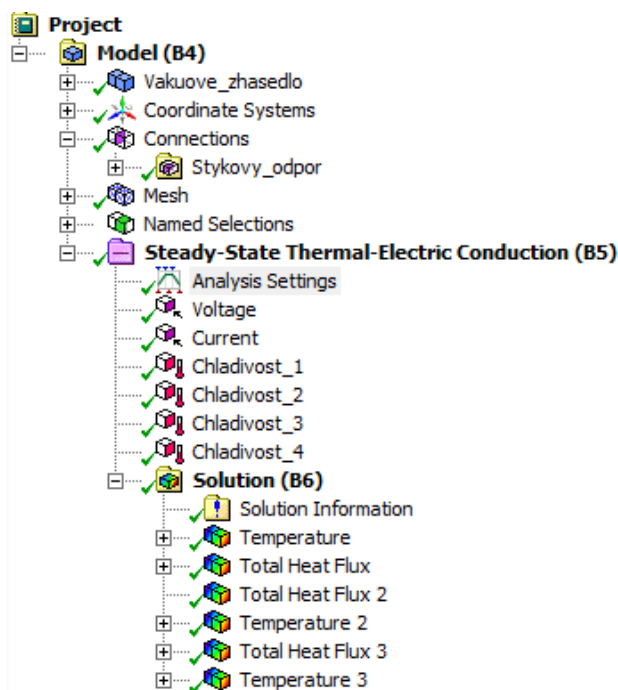
$$\text{Thermal Cond. Value} = \frac{2}{S \cdot R_{TS}} = \frac{2}{907 \cdot 10^{-4} \cdot 0,247} = 8927 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7.3)$$

$$\text{Electric Cond. Value} = \frac{2}{S \cdot R_S} = \frac{2}{907 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 1,11 \cdot 10^9 \text{ S} \cdot \text{m}^{-2} \quad (7.4)$$

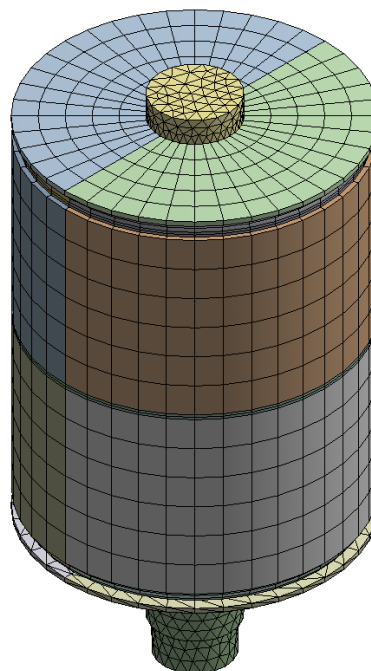


Obr. 7.3 Způsob zadání stykového odporu v ANSYSu a jeho grafická interpretace

Následuje pokrytí modelu výpočetní sítí (vysítováním), což je nejobtížnější část. Správné vysítování zásadním způsobem ovlivňuje správnost, přesnost a délku výpočtu. Typ sítě byl volen s preferencí 45% pro elektromagnetismus. Pro dokončení výpočtu bylo třeba síť mnohokrát modifikovat a počet prvků na jednotlivých objemech natvrdo nastavit, jelikož automatizované síťování nevedlo ke zdárnému dokončení výpočtu. Modifikace byly prováděny pomocí příkazu *Sizing*, ten byl aplikován na důležité hrany, plochy i objemy. Zde největší komplikace působil vlnovec – toto těleso je totiž velmi členité a tenké. Konečná síť je patrná z obr. 7.5, vysítování dalších prvků je uvedeno v příloze.



Obr. 7.4 Úpravy v elektrotepelném modulu

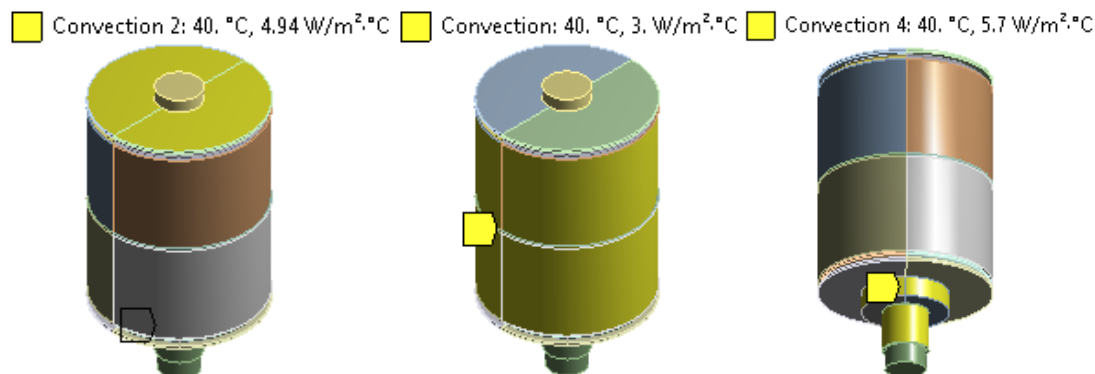


Obr. 7.5 Vysíťování modelu – vnější pohled

Pomocí funkce *Named Selections* můžeme snadno vybírat požadované části, které si předem vybereme, ovšem pro samotný výpočet tato funkce není podstatná. Nyní již přicházíme k samotné elektrotepelné analýze. Zdroj tepelných ztrát můžeme snadno zadat pomocí úbytku napětí nebo proudu. Druhá možnost je mnohem praktičtější, protože proud musí zůstat za všech okolností konstantní. Ustálené oteplení se počítá pro jmenovitý proud. Zde využijeme základní definice efektivní hodnoty střídavého proudu, která vyvolá stejné tepelné účinky jako by obvodem tekla stejná hodnota proudu stejnosměrného. Zadáme tedy velikost stejnosměrného proudu a to následovně – na vstupní plochu pevného kontaktu aplikujeme nulový potenciál (*Voltage*) a do protější výstupní plochy pohyblivého kontaktu aplikujeme hodnotu proudu.

$$I = I_{DC} = 1000 \text{ A} \quad (7.5)$$

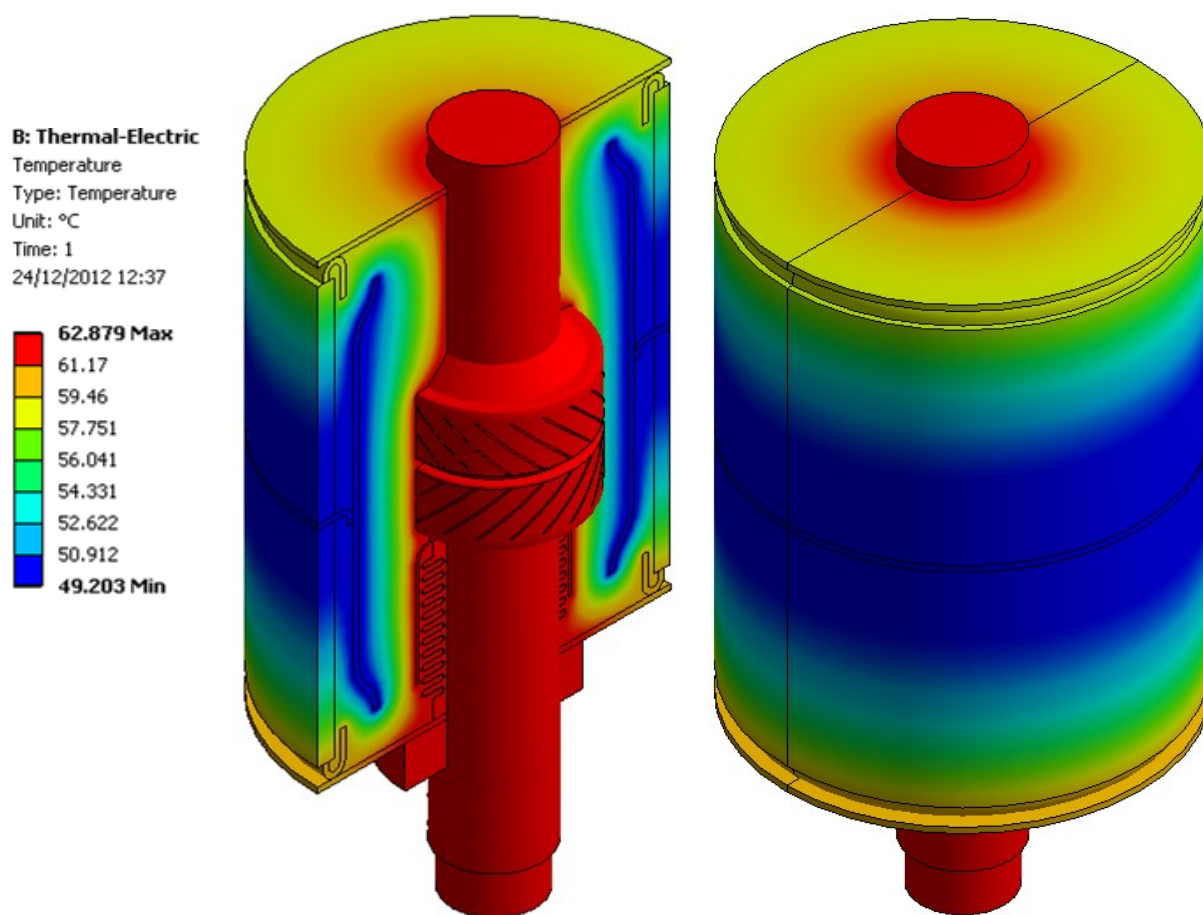
Proudovodná dráha je určena rezistivitou jednotlivých materiálů. Odlišným chladicím plochám odpovídají různí součinitelé chladiivosti. Ty jsou shodné jako u výpočtu pomocí tepelné sítě a vycházejí z tabulky 4.2. Protože teplo se nesmí šířit přívodními svorkami dál po proudovodné dráze, nebyl na tuto plochu aplikován žádný součinitel chladiivosti. Všechna potřebná data byla zadána, nyní následuje výpočet a vyhodnocení.



Obr. 7.6 Ukázka zadání různých součinitelů chladiivosti

7.2. Vyhodnocení tepelného modelu

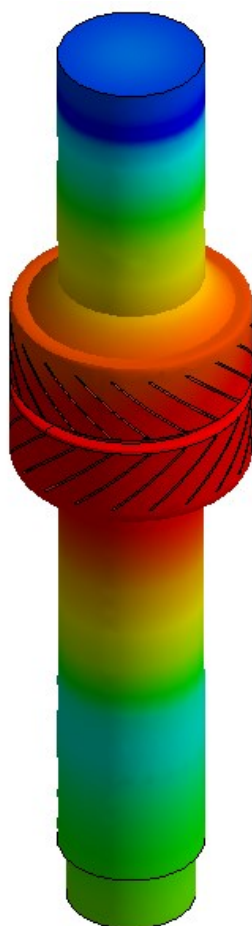
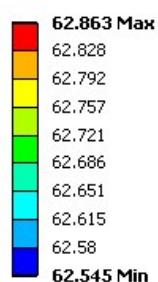
Zhášedlo jako proudovodná součást vakuového spínacího přístroje musí být schopno trvale přenášet jmenovitý proud. Přitom oteplení jednotlivých dílů nesmí překročit hodnoty uvedené v tab. 4.1 pro maximální teplotu okolí 40 °C. To je maximální přípustná hodnota pro přístroje ve vnitřním prostředí. Jak je patrné z obr. 7.7 navržené zhášedlo těmto požadavkům s rezervou vyhovuje. Důležitějším ukazatelem je samostatné rozložení teploty. Zde můžeme kontrolovat, jestli nedochází k lokálnímu přehřívání zejména v místě kontaktního styku, kde je zpravidla dosahováno nejvyšších teplot, v tomto případě je to téměř 63 °C. Dále si zde můžeme potvrdit, že vakuum je výborný tepelný izolant a teplo se jím, až na záření, téměř nepřenáší. Proto jsou kontakty vakuového zhášedla velmi masivní a navrhují se pro nízkou proudovou hustotu. Slouží totiž kromě vedení proudu také k odvodu tepelných ztrát k přírodním svorkám zhášedla. To je místo kde dochází k odvodu největšího množství tepla, proto se zde pro vyšší jmenovité proudy často umísťují chladiče. Velké množství tepla se odvede také přírodním víkem, které částečně pracuje jako zmíněný chladič. Přes vnější keramickou izolaci se odvede jen malé množství tepla, jednak z důvodu její nižší tepelné vodivosti, ale hlavně díky malé ploše tepelného spoje s víkem. Zbývá část je totiž dobře izolovaná vakuem. Na této izolaci se také logicky nachází místo nejnižší teploty (49°C).



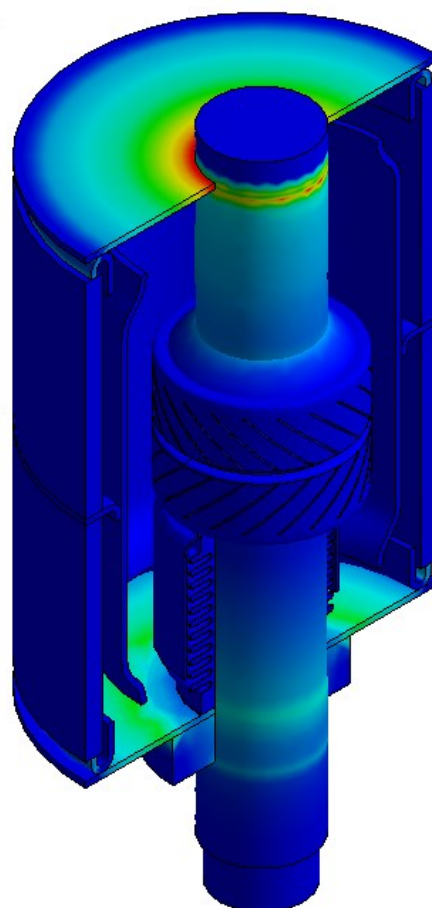
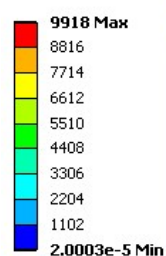
Obr. 7.7. Rozložení teploty v 3D modelu vakuového zhášedla

Vzhledem k výborné tepelné vodivosti mědi má prakticky celý kontaktní systém stejnou teplotu. Jak je patrné z obr. 7.8 tepelný spád je pouhých 0,3 °C. Je zde také názorněji vidět rozložení teploty na samotném kontaktním systému, a také, že k největšímu oteplení dochází v okolí místa styku.

B: Thermal-Electric
 Temperature 2
 Type: Temperature
 Unit: °C
 Time: 1
 24/12/2012 12:20



B: Thermal-Electric
 Total Heat Flux
 Type: Total Heat Flux
 Unit: W/m²
 Time: 1
 24/12/2012 12:36



Obr. 7.8 Rozložení teploty kontaktního systému

Obr. 7.9 Rozložení tepelného toku zhášedla

Z rozložení tepelného toku z obr. 7.9 je patrné, že velké množství tepla přestupuje z kontaktního systému vedením do obou vík zhášedla. Zřetelnější je to zejména u horního víka, kde není vodící kroužek, který se nemalou měrou podílí na vedení tepla.

Výsledná teplota je přibližně stejná jako u výpočtu pomocí tepelné sítě, proto dosažené výsledky lze považovat za správné. U numerického modelu je maximální teplota nižší přibližně o 2 °C, což je způsobeno mnoha zjednodušeními u tepelné sítě, zejména pak zanedbáním určitých součástí zhášedla, které se podílejí na chlazení. To je vodící kroužek, vlnovec nebo přestup tepla vedením do izolace zhášedla. I přes tyto nedostatky je tento kontrolní výpočet dostačující.

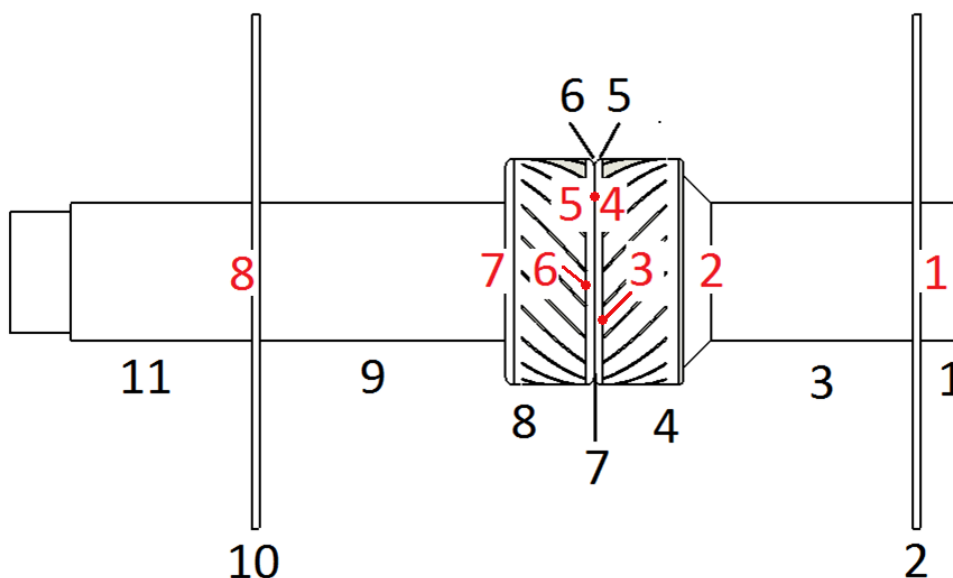
7. 3. Kontrolní výpočet oteplení pomocí tepelné sítě

Tepelná síť je obdobou sítě elektrické. Proto také její řešení, je analogické k řešení sítě elektrické. Základem matematického zápisu tepelné sítě je uzlová rovnice, podle které je součet proudů (tepelných toků) v uzlu roven nule. Neznámou a hledanou veličinou je oteplení uzlu. Pro n uzlů máme k dispozici n uzlových rovnic, tedy řešitelnou soustavu. Možnosti řešení jsou následující:

- Klasické řešení (matice)
- Iterační metoda
- Metoda třetí hodnoty (analýza)

První dva uvedené postupy jsou pracné a zdlouhavé, a to tím více, čím větší je počet uzlů sítě. Přičemž jsou vhodné pro převedení na číslíkové řešení pomocí počítače. Jednořadá tepelná síť připouští ještě jiný způsob řešení, toto řešení můžeme nazvat metodou třetí hodnoty. Je to postup poměrně jednoduchý. Vychází ze skutečnosti, že všechny parametry R_T , Q , ϑ_∞ jsou pro výpočet sítě konstantami, a že nutné matematické operace se omezují na slučování a násobení, takže změna výstupního oteplení vede jen k lineární změně toků a oteplení v kterémkoliv místě sítě. Při výpočtu postupujeme tak, že zvolíme oteplení na jednom konci sítě, propočítáme celou síť až k opačnému konci. Pokud neodhadneme správnou velikost oteplení vstupního uzlu, bude mít tepelný tok podélnou větví přívodu opačného konce nikoliv nulovou, ale konečnou hodnotu. Nastíněný postup je potřeba provést třikrát. Nejprve provedeme dva výpočty pro dvě rozdílné vstupní hodnoty oteplení, které dají dvě velikosti výstupních toků. Správnou velikost oteplení, pro které je výstupní tok nulový, určíme z grafického průběhu.

Pro výpočet oteplení zhášedla bylo vycházeno z metody třetí hodnoty, avšak pro řešení byl použit tabulkový procesor, což umožnilo zahrnout i vliv tepelných součinitelů materiálu a změnu souhrnné chladiivosti povrchu. Vakuové zhášedlo bylo rozděleno na jednotlivé díly a uzly dle obr. č. 7.10, každý díl představuje určitý prvek tepelné sítě se svými specifickými parametry. Ustálené oteplení se počítá pro jmenovitý proud v tomto případě $I_N = 1000\text{A}$. Oteplení prvku nesmí přesáhnout maximální dovolené oteplení. Výpočet bude sloužit pouze k ověření správnosti numerické metody.



Obr. 7.10 Rozdělení zhášedla na jednotlivé díly a uzly

Pro velkou rozsáhlost zde není uveden postup výpočtu ale jen podstatné výsledky. Tepelná síť je uvedena v příloze č. 8, příklad výpočtu v příloze č. 9.

Tab. 7.2 Oteplení jednotlivých uzlů

Číslo prvku	Název prvku	Uzel	\dot{Q} (W)	ϑ (°C)	T (°C)
1	těleso pevného kontaktu vně	1	1.810	24.6	64.60
2	horní víko				
3	těleso pevného kontaktu uvnitř	2	1.192	24.88	64.32
4	hlava pevného kontaktu	3	1.106	24.92	64.28
5	kontaktní disk pevného kontaktu	4	0.095	24.93	64.27
6	místo kontaktního styku	-	-	-	-
7	kontaktní disk pohyblivého kontaktu	5	-0.915	24.93	64.27
8	hlava pohyblivého kontaktu	6	-1.002	24.92	64.28
9	těleso pohyblivého kontaktu uvnitř	7	-1.657	24.89	64.31
10	dolní víko	8	0	24.58	64.58
11	těleso pohyblivého kontaktu vně				

Z tab. 7.2 je patrné oteplení a teplota zhášedla pro jednotlivé tepelné uzly. Nejvyšší teplota je v místě kontaktního styku, přičemž směrem k přívodům zhášedla teplota klesá. Protože měď je velmi dobrý vodič tepla, je tento pokles jen velmi mírný (0,3 °C). Z rostoucího tepelného toku směrem k přívodům je zřejmé, že zhášedlo je chlazeno zejména těmito přívody. Při srovnání tab. 7.2 s obr. 7.7 a 7.8 dojdeme k závěru, že výpočet pomocí tepelné sítě i pomocí metody konečných prvků vede k obdobným výsledkům. Výsledné maximální teploty se liší pouze o 1,4 °C. Z obdobných závěrů ze dvou zcela odlišných postupů lze předpokládat správnost dosažených výsledků.

8. Závěr

Diplomová práce je věnována vakuovým zhášedlům a jejím modelům. Nejprve je teoreticky rozebrána podstata vypínání střídavého proudu ve vakuu, kde je vysvětlen elektrický oblouk hořící ve vakuu, jeho vlastnosti, podoby a vlastní zhášení. V následující kapitole jsou vysvětleny specifické vlastnosti vakuových zhášedel, jejich konstrukce a základní rozdělení podle typu zhášení na zhášedla s radiálním a axiálním magnetickým polem. K pochopení elektromagnetického a elektrotepelného modelu slouží rozbor silových a tepelných účinků elektrického proudu. Je zde také vysvětleno silové působení mezi dvěma vodiči a na pravoúhlý záhyb, který je základem pro simulaci pohybu oblouku. V další části jsou vysvětleny prvky použité pro sestavení tepelné sítě, tepelný součinitel odporu materiálu a souhrnná chladivost povrchu, která je nejdůležitějším parametrem pro správné sestavení elektrotepelného modelu.

Následující kapitola se zabývá realizací zhášedla s RMF pro oba modely. Jsou zde uvedeny zadané výchozí parametry zhášedla a použité materiály pro jeho konstrukci. Geometrický model byl vytvořen v programu Solidworks, stejně jako technické výkresy uvedené v přílohách č. 11 – 14. Základní geometrie zhášedla vychází z běžně dostupné literatury a katalogových materiálů společností SIEMENS a ABB. Základní rozměry kontaktního systému byly vypočteny pro záměrně nízkou proudovou hustotu $J = 1 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$, z důvodu špatného chlazení. Pro jmenovité napětí 12 kV a odpovídající zhášecí špičku byla zvolena výška zdvihu kontaktů 10 mm [1]. Pro návrh hlavy kontaktů má největší význam úhel sklonu zářezů, které tvoří pravoúhlý záhyb. Tímto sklonem je určena vypínací rychlost oblouku, která má zásadní význam pro úspěšné uhašení oblouku. Úhel sklonu je pro první přiblížení zvolen a na základě analýzy z numerického modelu vhodně upraven.

Praktické řešení elektromagnetického modelu vakuového zhášedla s RMF bylo provedeno v laboratoři modelování fyzikálních polí, vybavenou programem ANSYS pracujícím na principu metody konečných prvků. Použitý program umožňuje pouze statickou analýzu, zatímco elektromagnetický model představující simulaci pohybu oblouku je analýzou dynamickou. Proto byl celý výpočetní proces rozdělen na jednotlivé kroky. Počet výpočetních kroků byl volen stejným způsobem, jako kvalita výpočetní sítě (množství elementů), a to kompromisem mezi přesností a dobou výpočtu. Jeden výpočetní krok má délku 0,5 ms, a proto všechny časově proměnné veličiny jsou rozděleny na 11 konstantních hodnot. Přičemž výsledné hodnoty prvního kroku, jsou brány jako výchozí hodnoty kroku následujícího. Tento postup byl opakován ve všech jedenácti krocích. Vlastní simulace pohybu oblouku po povrchu kontaktu začíná po úplném oddálení kontaktů, které nastává po 10 ms. Simulace je provedena pro nejnepríznivější případ, kdy k oddálení kontaktů dojde právě v době maxima vypínaného zkratového proudu (16 kA). Pro výpočet aktuální polohy oblouku a maximální vypínací rychlosti je potřebné znát síly působící na oblouk a jeho hmotnost. Proměnná hmotnost byla vypočtena na základě množství odpařeného materiálu kontaktů dle obr. 2.5 v závislosti na čase a amplitudě vypínaného proudu. U reálného oblouku navíc malé množství odpařeného materiálu ulpí na stěnách pouzdra zhášedla, které není ve výpočtu zohledněno. Výsledky pro jednotlivé výpočetní kroky shrnuje tab. 6.2. Síla působící na těleso oblouku byla rozložena pomocí goniometrických funkcí na dvě složky. Normálová složka udržuje oblouk na okraji kontaktního disku a tečná uvádí oblouk do pohybu. Tyto veličiny byly dosazeny do pohybových rovnic, na jejichž základě bylo vypočteno zrychlení, rychlost, dráha a úhel posuvu oblouku v cylindrickém souřadném systému. Zrychlení oblouku je kladné a klesá s kvadrátem proudu, proto se oblouk pohybuje zrychleně a své nejvyšší rychlosti $79 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dosáhne těsně před jeho zánikem v nule proudu. To odpovídá rychlosti, kterou dosahují skutečná zhášedla ($70\text{-}150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Tato vypínací rychlost se při návrhu nastavuje úhlem sklonu zářezů kontaktů. Pro úpravu požadované rychlosti je nutné provést optimalizaci sklonu těchto zářezů.

Řešení elektrotepelného modelu vakuového zhášedla s RMF v ustáleném stavu bylo provedeno obdobným způsobem jako elektromagnetický model v laboratoři modelování fyzikálních polí programem ANSYS. Pro výpočet lze využít statický elektrotepelný model, protože ustálené oteplení nastává za nekonečně dlouhou dobu, kdy už se žádné teplo neakumuluje a vše je odvedeno povrchem zhášedla do okolí. Také střídavý jmenovitý proud, lze snadno nahradit efektivní hodnotou, která reprezentuje stejné tepelné ztráty v objemu, jako proud střídavý. Model celého zhášedla má poměrně složitou geometrii, což představovalo komplikace při pokrytí modelu výpočetní sítí. Problémy způsoboval zejména tenkostěnný těsnící člen – vlnovec. To bylo vyřešeno rozdělením modelů na více částí a množstvím pevně nastavených parametrů výpočetní sítě. Rozdělení modelu bylo provedeno i z důvodu simulace místa kontaktního styku. Místo styku představuje plocha mezi dvěma kontaktními disky vykazující určitý tepelný a elektrický odpor. Plocha ovšem není prostorový objekt (má nulovou axiální délku), proto nelze zadat velikosti těchto odporů, které jsou funkcí délky. Řešení spočívá v přepočtu odporů na plochu tak, aby způsobovaly stejné tepelné ztráty. To je patrné z rovnice 7.3 a 7.4. Jelikož se jedná o otevřené provedení zhášedla, ztrátové teplo odvádí jeho povrch přímo do okolí. Měrná chladivost má pro výpočet zásadní význam a zahrnuje tepelné ztráty radiací i konvekcí. Jejímu správnému zvolení byla proto věnována značná pozornost. Tento činitel je také teplotně závislý, což bylo kompenzováno opakováním výpočtu (metoda třetí hodnoty). Různým chladicím plochám zhášedla odpovídají různé měrné chladivosti. To je způsobeno odlišnou velikostí, tvarem a emisivitou povrchu. Pro výchozí teplotu okolí 40 °C se zhášedlo oteplí o 23 °C na teplotu 63 °C. Tyto teploty vyhovují maximálnímu dovolenému oteplení dle tab. 4.1. Z obrázků rozložení teploty je patrné, že vakuové zhášedlo se chladí zejména prostřednictvím přívodů a vík, kde se pro vyšší jmenovité proudy umisťuje chladič, který zlepší tepelné poměry uvnitř zhášedla. Nejvyšší teplota byla dosažena v oblasti kontaktního styku a směrem k přívodům jen mírně klesá. To je důsledkem masivních kontaktů z mědi, která patří mezi nejlepší tepelné vodiče. Barevné kontury zobrazující rozložení teploty ve vakuovém prostředí zhášedla podle obr. 7.7 nemají vypovídající hodnotu a jsou způsobeny nedokonalým modelem, který pracuje pouze s tepelnou vodivostí. Správnost elektrotepelného modelu byla ověřena výpočtem pomocí tepelné sítě. Výsledná maximální teplota zjištěna tímto postupem je vyšší o 1,4 °C. Z takto obdobných závěrů ze dvou odlišných postupů lze předpokládat správnost dosažených výsledků.

Za pomoci metody konečných prvků a příslušného programu, jsme získali představu o probíhajících pochodech uvnitř zhášedla, aniž bychom potřebovali sofistikované měřicí přístroje. Na základě prezentovaných modelů lze snadno změnou vstupních parametrů provádět požadované optimalizace. Změnou úhlu zkosení zářezů lze nastavit požadovanou vypínací rychlost pohybu oblouku nebo úpravou tvaru hlavy kontaktu může měnit velikost síly, která udržuje oblouk na okraji kontaktu, kde jsou horší podmínky pro jeho existenci. Můžeme také ověřit dovolené oteplení při změně proudové hustoty či přítlaku kontaktní pružiny a zvýšit jmenovitý proud přidáním chladiče na přívody zhášedla. To vše, aniž bychom museli optimalizovaný přístroj vyrábět, což je pro jednotlivé zkušební kusy velmi komplikované a taky nákladné. Náklady samozřejmě stoupají s počtem neúspěšných pokusů. Tyto nepříjemnosti ovšem při modelování na počítači odpadávají. Překážkou může být jen nemalá cena programového vybavení.

9. Použitá literatura

- [1] HYTKA, Z. – KAČOR, P. – HELŠTÝN, D. *Elektrické přístroje spínací ochranné a jisticí*. Skriptum VŠB - TU Ostrava, 2003. ISBN 80-248-0315-1
- [2] HAVELKA, O. *Elektrické přístroje*. Praha: SNTL/ALFA, 1985. ISBN 55-650-84
- [3] HAVELKA, O. *Stavba elektrických přístrojů I*. Vysoké učení technické v Brně, 1984. ISBN. 55-650-84
- [4] FINK, H. – HEIMBACH, M. - SHANG, W. *Vacuum interrupters with axial magnetic field contacts*. Ratingen / Germany: ABB Calor Emag Mittelspannung
- [5] FENSKI, B. – FINK, H. – FUGEL, T. GENTSCH, D. – RÜMENAPP, T. *Vacuum interrupters and embedded poles for medium voltage*. Ratingen / Germany: ABB Calor Emag Mittelspannung
- [6] GREENWOOD, A. *Vacuum switchgear*. The institution of electrical engineers, London, 1994. ISBN 08-529-6855-8
- [7] ARTBAUER, O. *Tepelný výpočet elektrických přístrojů*. Vysoká škola technická v Bratislavě, 1963. ISBN 63-732-63
- [6] Laboratoř modelování fyzikálních polí.
URL: <<http://lmfp.vsb.cz/>> [cit. 2013].
- [6] Firemní dokumentace Siemens, Vacuum interrupters.
URL:<<http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-distribution/medium-voltage-indoor-devices/vacuum-interrupters/>> [cit. 2013].
- [8] Firemní dokumentace ABB, Vacuum interrupters.
URL:<<http://www.abb.com/product/db0003db004279/c125739900636470c1256df6003c040f.aspx?productLanguage=us&country=CZ>> [cit. 2013].
- [10] NOVOTNÝ, V. – VÁVRA, Z. *Spínací přístroje a rozvaděče na vysoké napětí*. ZSNTL Alfa Praha, 1986

10. Seznam příloh

1. Rozložení napětí na tělese kontaktu a oblouku
2. Magnetická indukce působící na těleso oblouku mezi kontakty (detail, vektorové zobrazení)
3. Magnetická indukce působící na těleso oblouku mezi kontakty (horní a boční pohled)
4. Pohyb oblouku po povrchu kontaktu
5. Ukázka vysíťování elektrotepeelného modelu
6. Ustálené oteplení vakuového zhášedla
7. Ustálené oteplení kontaktního systému
8. Výpočetní tepelná síť vakuového zhášedla
9. Výpočet tepelné sítě
10. Tabulka dílčích výsledků při řešení tepelné sítě
11. Technický výkres kontaktního systému
12. Technický výkres pevného kontaktu
13. Technický výkres pohyblivého kontaktu
14. Technický výkres kontaktního disku
15. Silové působení na tělesa kontaktů